

ADVERTIMENT. L'accés als continguts d'aquesta tesi doctoral i la seva utilització ha de respectar els drets de la persona autora. Pot ser utilitzada per a consulta o estudi personal, així com en activitats o materials d'investigació i docència en els termes establerts a l'art. 32 del Text Refós de la Llei de Propietat Intel·lectual (RDL 1/1996). Per altres utilitzacions es requereix l'autorització prèvia i expressa de la persona autora. En qualsevol cas, en la utilització dels seus continguts caldrà indicar de forma clara el nom i cognoms de la persona autora i el títol de la tesi doctoral. No s'autoritza la seva reproducció o altres formes d'explotació efectuades amb finalitats de lucre ni la seva comunicació pública des d'un lloc aliè al servei TDX. Tampoc s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant als continguts de la tesi com als seus resums i índexs.

ADVERTENCIA. El acceso a los contenidos de esta tesis doctoral y su utilización debe respetar los derechos de la persona autora. Puede ser utilizada para consulta o estudio personal, así como en actividades o materiales de investigación y docencia en los términos establecidos en el art. 32 del Texto Refundido de la Ley de Propiedad Intelectual (RDL 1/1996). Para otros usos se requiere la autorización previa y expresa de la persona autora. En cualquier caso, en la utilización de sus contenidos se deberá indicar de forma clara el nombre y apellidos de la persona autora y el título de la tesis doctoral. No se autoriza su reproducción u otras formas de explotación efectuadas con fines lucrativos ni su comunicación pública desde un sitio ajeno al servicio TDR. Tampoco se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al contenido de la tesis como a sus resúmenes e índices.

WARNING. Access to the contents of this doctoral thesis and its use must respect the rights of the author. It can be used for reference or private study, as well as research and learning activities or materials in the terms established by the 32nd article of the Spanish Consolidated Copyright Act (RDL 1/1996). Express and previous authorization of the author is required for any other uses. In any case, when using its content, full name of the author and title of the thesis must be clearly indicated. Reproduction or other forms of for profit use or public communication from outside TDX service is not allowed. Presentation of its content in a window or frame external to TDX (framing) is not authorized either. These rights affect both the content of the thesis and its abstracts and indexes.

**CARACTERIZACIÓN DE
LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES
EN LA ZONA COSTERA**

TESIS DOCTORAL DE:

MARGARITA DÍEZ RILOVA

DIRIGIDA POR:

**JOSE MANUEL REDONDO
Y
JOAN PAU SIERRA**

**EN EL PROGRAMA DE
CIENCIAS DEL MAR
DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA**

BARCELONA, NOVIEMBRE 2011

RESUMEN

En nuestra sociedad los derivados del petróleo son la fuente principal de energía. Los accidentes con hidrocarburos han protagonizado episodios de contaminación trágicos para la biosfera del océano. En este capítulo se analizan algunos de ellos, sus efectos y sistemas de limpieza. Asimismo se describen las ecuaciones que rigen la turbulencia y los procesos de dispersión costera.

La complejidad de los procesos físicos, químicos o biológicos que actúan sobre el crudo en el mar, hacen difícil su estudio en laboratorio. Visto el problema y la necesidad de tomar decisiones urgentes e inteligentes se han hecho numerosas campañas de campo para estudiar estos procesos.

El tratamiento digital de imágenes de vídeo permite numerosas aplicaciones en el campo de la hidromorfodinámica, pues es posible controlar la evolución espacial y temporal de cualquier parámetro con evidencias visibles. Las imágenes sufren numerosas alteraciones, deformaciones, ruidos, etc., que hay que depurar con filtros y transformaciones adecuadas previamente al análisis cuantitativo. Parte del trabajo consiste en desarrollar la metodología para llevar a cabo alguna de estas aplicaciones en el estudio de la difusión turbulenta en el océano.

Para este estudio se han realizado distintas campañas de campo en zonas de hidrodinámica con escalas y procesos físicos predominantes diferentes: zonas costeras (Delta del Ebro y playa de Vilanova); en aguas confinadas (puerto de Barcelona y puerto de Recife); y en aguas abiertas (Mediterráneo Occidental). En los mismos se han empleado diferentes tecnologías (foto, vídeo, satélite). En los experimentos se midieron los agentes forzadores: viento, oleaje, marea, etc. y se correlacionaron para caracterizar los diferentes escenarios. También se ha revisado el estado del arte de otras campañas de campo y del tratamiento digital de imágenes a distintas escalas.

El análisis de las imágenes y datos de los experimentos han consistido en caracterizar la difusión a la pequeña escala de trazadores puntuales o lagrangianos (flotadores) y trazadores continuos o agentes dispersivos (manchas de leche y fluoresceína) en la superficie del agua y examinar la influencia de los agentes forzadores: viento, oleaje, corrientes internas, marea, temperatura, morfología, topología del flujo, etc., con el objetivo de encontrar las dependencias funcionales del coeficiente de difusión medido en cada ámbito. El estudio hidrodinámico se ha realizado a tres escalas básicas dentro de la autosimilitud de los procesos turbulentos: turbulencia, oleaje y corrientes.

Se presenta una descripción metodológica de la adquisición de imágenes desde distintos medios, sobre los equipos, los tratamientos de imágenes y la cuantificación de los parámetros. Además se analizan las teorías sobre turbulencia, el efecto de la intermitencia, vorticidad, estratificación.

Los coeficientes de difusión presentan una gran variedad condicionada a la dependencia característica con la escala temporal y espacial de los fenómenos predominantes. En el caso de una distribución de la energía con un espectro espacial del tipo $E(k) \propto K^{-m}$ (Kolmogorov 1941, $m=5/3$ en flujo local en equilibrio) la difusión turbulenta depende de la escala espacial siguiendo la ley de Richardson (1922 y 1926) $K(l) \propto L^{4/3}$. Si consideramos que la turbulencia ambiental está caracterizada por una

escala (L =escala integral), se demuestra que la difusión será máxima cuando la mancha sea comparable a $\sigma=L$, difusión anómala. Los coeficientes de difusión medidos se agruparon según el número de Reynolds y se hizo una clasificación: hipodifusividad, hiperdifusividad y difusión anómala. Esta caracterización de escenarios permite parametrizar el medio para modelizar su comportamiento y poder predecir su evolución.

También se ha demostrado que la técnica del análisis digital de imágenes es una técnica no intrusiva que ofrece datos de oleaje de una zona, en contraposición a los datos puntuales de los sensores. Los espectros obtenidos han demostrado una gran fiabilidad. Las imágenes ofrecen información instantánea y información acumulada, que al ser tratadas, permiten obtener espectros de energía, detectar la morfología de barras sumergidas, identificar corrientes de retorno, caracterizar run-up, etc.

En el puerto de Barcelona se tomaron numerosos datos de velocidades de viento (V_v) y advección (V_c) llegando a una buena correlación entre ambas (V_{cx} (cm/s)= 2.306 V_{vx} (m/s)+ 0.148) y constatando que hay una influencia de otros efectos como la marea, reflexión de los muelles o difracción que no se pueden obviar.

Otro tipo de imágenes son las de satélite. Se analizan imágenes de Rádar de Apertura sintética SAR para detectar episodios de contaminación y analizar la vorticidad del medio. Del primer análisis de imágenes satélite resultó sorprendente el gran número de manchas detectadas. Se comprobó que los vertidos siguen la Ley de Zipp (distribución hiperbólica entre los accidentes y su tamaño).

Por otro lado, se analizó la vorticidad a gran escala y la estabilidad de los remolinos. Se vió que estos siguen los cañones submarinos. Con el análisis fractal del contorno de la mancha se puede caracterizar su origen (antropogénico o natural como masas de plankton) y su envejecimiento o persistencia, etc.

También es importante resaltar la complejidad de la interacción no-lineal de los distintos agentes que producen difusión en el mar. Se comprueba que es posible que la intermitencia de la turbulencia pueda parametrizarse mediante medidas fractales y que el uso de momentos de orden superior ayuda a comparar medidas de difusión a distintas escalas mediante la Ley de Richardson Generalizada. Así se relaciona la pendiente del espectro, la intermitencia y la dependencia temporal de la difusión efectiva.

Con todo ello, se pretende efectuar contribuciones puntuales que ayuden a comprender mejor los procesos de dispersión de los contaminantes en el mar y, por consiguiente, ayudar en la lucha contra este fenómeno.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, estoy agradecida a: Andrés Rodríguez, quien me introdujo en el tema despertando mi curiosidad;

Al Ministerio de Educación y Ciencia por la beca de Investigación y Desarrollo de Formación de Personal Univesitario, a la Universidad de Cambridge por la beca para el Summer School en dinámica de fluidos y a Ports de la Generalitat por la beca del Máster en Ingeniería y Explotación Portuaria.

Al Laboratorio de Ingeniería Marítima y al departamento de Física Aplicada por los proyectos europeos en los que se ha participado (FANS, Clean Seas) y a los convenios de colaboración con la ingeniería Alatec-Haskoning y la Autoridad Portuaria de Barcelona por su confianza y medios ofrecidos.

A Ports de la Generalitat por la experiencia práctica portuaria profesional como técnica en el puerto de Palamós, responsable en medioambiente, explotación y Responsable Territorial de la Zona Portuaria Centro.

A los tutores de la presente tesis, Joan Pau Sierra y José Manuel Redondo por su tiempo, dedicación y por todo cuanto con ellos me ha sido posible aprender; y por compartir el interés, facilitarme su metodología de estudio, los datos e imágenes y la profundización del estudio de la turbulencia, la difusión y la mezcla.

También quiero agradecer su colaboración a todos aquellos que han participado en la obtención de las imágenes y de las medidas de campo, quienes conocen "el valor de un dato" Eduardo Bahia, Cesar Mosso, Maria Ozilea Bezerra, Roberto Castilla y Alexei Platonov.

Por último, y no por ello en menor grado, estoy agradecida a mis padres por facilitarme las cosas y apoyarme de forma que haya podido llegar hasta aquí, y a Alberto por permitirme sacar tiempo distrayendo a mis amores, Nerea y Pau.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	1—9
1.1	JUSTIFICACIÓN	1—10
1.2	PLANTEAMIENTO	1—11
1.3	OBJETIVOS	1—13
1.3.1	<i>Objetivos Generales.....</i>	<i>1—14</i>
1.3.2	<i>Objetivos Particulares.....</i>	<i>1—14</i>
2	ANTECEDENTES	2—16
2.1	ESTUDIOS EN ZONAS COSTERAS CON IMÁGENES.....	2—17
2.1.1	<i>Técnicas de Observación.....</i>	<i>2—17</i>
2.1.2	<i>Fotografía Aérea.....</i>	<i>2—17</i>
2.1.3	<i>Fotografía terrestre.....</i>	<i>2—17</i>
2.1.4	<i>Fotografía Estereoscópica.....</i>	<i>2—18</i>
2.1.5	<i>Imágenes Promediadas.....</i>	<i>2—18</i>
2.1.6	<i>Vídeo.....</i>	<i>2—18</i>
2.1.7	<i>Imágenes de Satélite.....</i>	<i>2—20</i>
2.2	EXPERIMENTOS EN MAR ABIERTO Y EN LA COSTA	2—20
2.3	RESUMEN DE ALGUNOS EXPERIMENTOS DE CAMPO CON IMÁGENES 2—23	
2.3.1	<i>Delta 93.....</i>	<i>2—23</i>
2.3.2	<i>Vilanova y Recife.....</i>	<i>2—24</i>
2.3.3	<i>Sistema ARGUS.....</i>	<i>2—26</i>
2.3.4	<i>Seguimiento de dragados en canales de navegación.....</i>	<i>2—33</i>
2.3.5	<i>Medida de la pendiente del agua en la zona de rotura.....</i>	<i>2—34</i>
2.4	ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA DIFUSIÓN TURBULENTA.....	2—36
3	CONTAMINACIÓN MARINA POR HIDROCARBUROS	3—41
3.1	ANTECEDENTES DE FUENTES DE VERTIDOS.....	3—42
3.2	PROPIEDADES DE LOS HIDROCARBUROS.....	3—45
3.3	EFFECTOS EN LOS ECOSISTEMAS MARINOS	3—48
3.3.1	<i>Aves.....</i>	<i>3—50</i>
3.3.2	<i>Mamíferos.....</i>	<i>3—50</i>
3.3.3	<i>Peces.....</i>	<i>3—50</i>
3.3.4	<i>Organismos superficiales.....</i>	<i>3—51</i>
3.3.5	<i>Organismos intermareales.....</i>	<i>3—51</i>
3.3.6	<i>Organismos del lecho marino.....</i>	<i>3—52</i>
3.3.7	<i>Marismas.....</i>	<i>3—53</i>
3.3.8	<i>Regiones polares.....</i>	<i>3—54</i>
3.3.9	<i>Arrecifes de coral.....</i>	<i>3—54</i>
3.4	PREVENCIÓN DE VERTIDOS.....	3—54
3.4.1	<i>Construcción de los barcos petroleros.....</i>	<i>3—56</i>
3.4.2	<i>Métodos operativos en los buques.....</i>	<i>3—57</i>
3.4.3	<i>Seguridad en la Navegación.....</i>	<i>3—57</i>
3.5	CONTROL DE VERTIDOS.....	3—58
3.5.1	<i>Control por sensores ópticos.....</i>	<i>3—58</i>
3.5.2	<i>Control por radar.....</i>	<i>3—59</i>
3.6	TÉCNICAS DE ELIMINACIÓN	3—59
3.6.1	<i>Limitación de la Mancha.....</i>	<i>3—59</i>
3.6.2	<i>Bombeo.....</i>	<i>3—60</i>
3.6.3	<i>Absorción.....</i>	<i>3—60</i>

3.6.4	<i>Biodegradación acelerada</i>	3—61
3.6.5	<i>Adsorción</i>	3—62
3.6.6	<i>Precipitación</i>	3—63
3.6.7	<i>Combustión</i>	3—63
3.7	EFFECTOS DE LAS TÉCNICAS DE LIMPIEZA.....	3—63
3.8	TIPOS DE VERTIDOS.....	3—64
3.8.1	<i>Vertido puntual</i>	3—64
3.8.2	<i>Contaminación crónica</i>	3—65
3.8.3	<i>Contaminantes persistentes</i>	3—67
4	DISPERSIÓN COSTERA Y TURBULENCIA	4—68
4.1	CONCEPTOS BÁSICOS.....	4—69
4.1.1	<i>Flujo viscoso</i>	4—69
4.1.2	<i>Conservación de masa</i>	4—69
4.1.3	<i>Ecuaciones de Navier-Stokes</i>	4—69
4.1.4	<i>Vorticidad</i>	4—70
4.1.5	<i>Flujo turbulento</i>	4—70
4.1.6	<i>Número de Reynolds</i>	4—71
4.1.7	<i>Ecuaciones de Reynolds</i>	4—71
4.1.8	<i>Difusión molecular. Ley de Fick</i>	4—72
4.1.9	<i>Difusión turbulenta</i>	4—72
4.1.10	<i>Mecanismos de dispersión</i>	4—73
4.1.11	<i>Dispersión horizontal</i>	4—74
4.1.12	<i>Agentes actuantes</i>	4—75
4.2	ESCALAS ESPACIALES Y TEMPORALES	4—77
4.3	TEORÍAS SOBRE LA TURBULENCIA.....	4—78
4.3.1	<i>Teoría de Kolmogorov y el Espectro Turbulento</i>	4—78
4.3.2	<i>Teoría de Boussinesq</i>	4—82
4.3.3	<i>Teoría de Prandtl para la Longitud de Mezcla</i>	4—83
4.3.4	<i>Teoría del Transporte de Vorticidad de Taylor</i>	4—84
4.3.5	<i>Hipótesis de Similitud de Von Kármán</i>	4—85
4.4	CLASIFICACIÓN DE LA TURBULENCIA.....	4—86
4.4.1	<i>Clasificación por escalas</i>	4—86
4.4.2	<i>Difusión molecular</i>	4—87
4.4.3	<i>Subrango inercial</i>	4—87
4.4.4	<i>Difusividad lineal</i>	4—88
4.4.5	<i>Difusión anómala</i>	4—89
5	ANÁLISIS DIGITAL DE IMÁGENES	5—90
5.1	CAPTACIÓN DE LAS IMÁGENES	5—91
5.2	CÁLCULO DIRECTO DEL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN TURBULENTA...5— 93	
5.3	SOFTWARE DE TRATAMIENTO AVANZADO DE IMAGENES	5—97
5.3.1	<i>DigiImage</i>	5—97
5.3.2	<i>“TICE”</i>	5—100
5.3.3	<i>Kd</i>	5—102
5.3.4	<i>DigiFlow</i>	5—103
5.4	POSTPROCESO DIGITAL.....	5—104
5.4.1	<i>Tratamiento previo de las cintas</i>	5—104
5.4.2	<i>Transformación de coordenadas</i>	5—105
5.4.3	<i>Selección de las imágenes a analizar</i>	5—110
5.4.4	<i>Correcciones para eliminar efectos no deseados</i>	5—112
5.5	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LAS IMÁGENES	5—114
5.5.1	<i>Coordenadas de puntos</i>	5—114

5.5.2	<i>Interpretación gráfica</i>	5—116
5.5.3	<i>Series temporales</i>	5—116
5.5.4	<i>Promediado temporal</i>	5—117
5.5.5	<i>Estadísticos</i>	5—118
5.5.6	<i>Análisis espectral</i>	5—119
5.5.7	<i>Análisis fractal</i>	5—120
6	EXPERIMENTOS	6—122
6.1	INTRODUCCIÓN	6—123
6.2	METODOLOGÍA DE LOS EXPERIMENTOS	6—123
6.3	CAMPAÑAS DE CAMPO	6—126
6.3.1	<i>Campaña Delta 93</i>	6—126
6.3.2	<i>Campaña Delta 96</i>	6—128
6.3.3	<i>Desembocadura del Ebro</i>	6—134
6.3.4	<i>Puerto de Barcelona</i>	6—135
6.4	IMÁGENES POR SATÉLITE SAR	6—143
7	RESULTADOS	7—145
7.1	COEFICIENTES DE DISPERSIÓN	7—146
7.1.1	<i>Resultados de Delta 93</i>	7—146
7.1.2	<i>Resultados de Delta 96</i>	7—148
7.1.3	<i>Resultados de Recife (Brasil)</i>	7—150
7.1.4	<i>Resultados de Vilanova i la Geltrú</i>	7—152
7.1.5	<i>Resultados del puerto de Barcelona</i>	7—153
7.2	DIFUSIÓN A GRAN ESCALA	7—158
7.2.1	<i>Identificación de manchas y advección</i>	7—159
7.2.2	<i>Contaminación marina</i>	7—162
7.2.3	<i>Resultados de Vorticidad</i>	7—163
7.3	EVOLUCIÓN DEL OLEAJE EN ZONA DE ROMPIENTES	7—165
7.3.1	<i>Sensor de presión de altura de ola</i>	7—165
7.3.2	<i>Sensor de nivel</i>	7—167
7.3.3	<i>Análisis de imágenes</i>	7—168
7.4	IDENTIFICACIÓN DE CORRIENTES	7—169
7.5	OTRAS CARACTERIZACIONES MORFOLÓGICAS	7—173
7.6	MODELADO NUMÉRICO	7—175
8	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	8—183
8.1	EVALUACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE MEDIDA	8—184
8.1.1	<i>Sistemas de captación</i>	8—184
8.1.2	<i>Equipo</i>	8—185
8.1.3	<i>Mecanismos de elevación</i>	8—185
8.1.4	<i>Metodología de las campañas de campo</i>	8—189
8.2	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE DISPERSIÓN	8—190
8.2.1	<i>Zona de rompientes</i>	8—190
8.2.2	<i>Turbulencia y dispersión</i>	8—191
8.2.3	<i>Análisis de los resultados de dispersión en el puerto de Barcelona</i>	8—193
8.2.4	<i>Efecto del viento en la dispersión</i>	8—199
8.2.5	<i>El efecto de la marea</i>	8—202
8.3	ESPECTROS DE ENERGÍA	8—204
8.4	CIRCULACIÓN INDUCIDA POR VARIACIONES DE BATIMETRÍA	8—206
8.5	DETECCIÓN DE CONTAMINACIÓN	8—210
8.6	CARACTERIZACIÓN DE LA VORTICIDAD EN EL MEDITERRANEO NOROCCIDENTAL	8—214

8.7	DEPENDENCIA DE LA INTERMITENCIA Y FRACTALIDAD: LEY DE RICHARDSON GENERALIZADA.....	8—217
9	CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....	9—224
9.1	PRINCIPALES CONCLUSIONES.....	9—225
9.2	TRABAJO FUTURO:.....	9—229
10	BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....	10—231
	ANNEXO 1: TEORÍA DE LA TURBULENCIA.....	1
A.1	INTRODUCCIÓN A LA TURBULENCIA.....	2
A.2	DESCRIPCIÓN INTEGRAL A DISTINTAS ESCALAS.....	3
A.3	CASCADA DE ENERGÍA Y INTERMITENCIA.....	6
A.3.1	<i>Cascada de energía.....</i>	6
A.3.2	<i>Disipación viscosa.....</i>	7
A.3.3	<i>Rango inercial.....</i>	7
A.3.4	<i>Efecto del empuje (b).....</i>	8
A.3.5	<i>Definición de intermitencia.....</i>	10
A.3.6	<i>Funciones de estructura.....</i>	10
A.4	ANÁLISIS FRACTAL Y MULTIFRACTAL.....	12
A.4.1	<i>Definición de dimensión fractal.....</i>	12
A.4.2	<i>Análisis multifractal.....</i>	12
A.4.3	<i>El método BOX-COUNTING.....</i>	13
A.4.4	<i>Función de densidad espectral.....</i>	14
A.4.5	<i>Aplicación de análisis MultiFractal a contornos.....</i>	16
A.5	EFFECTOS DE ESCALA.....	17
A.5.1	<i>Análisis dimensional.....</i>	17
A.5.2	<i>Simplificaciones dimensionales de Navier-Stockes.....</i>	19
A.5.3	<i>Interpretación física.....</i>	20
A.5.4	<i>Aplicación de análisis multifractal.....</i>	21

Annexo 2 Díez M, Bezerra MO, Mosso C, Castilla R y Redondo JM (2009) "Experimental measurements and diffusion in harbour and coastal zones." Il Nuovo Cimento della Società Italiana di Fisica C. Geophysics and space physics", Vol. 31 C, N. 5-6 DOI 10.1393/ncc/i2009 -10354-3 p. 843-859

Annexo 3 Tarquis AM, Platonov A, Matulka A, Grau J, Sekula E, Díez M y Redondo JM (2011) "Application of multifractal analysis to the study of SAR features and oil spills in the ocean surface." Non-Linear Processes in Geophysics 2011, npg-2010-123.

1 INTRODUCCIÓN

Como preámbulo se empieza justificando el estudio, se explica cómo se ha planteado y los objetivos que se han intentado alcanzar. También figura en este capítulo una breve descripción del contenido de este trabajo.

1.1 JUSTIFICACIÓN

La mejor manera de combatir la contaminación es la prevención, pero no siempre es posible.

El primer gran accidente de un petrolero referenciado en la bibliografía fue el Torrey Canyon, el 18 de marzo de 1967, con 119.000 toneladas de petróleo, afectando 150 km de costa de Cabo Cornualles. En 1978 se vertieron, en doce días, 223.000 toneladas de petróleo ligero y 4.000 toneladas de fuel pesado del Amoco Cádiz cerca de Cabo Finisterre. La agitación del oleaje produjo que las fracciones ligeras, de baja viscosidad, se emulsionaran dando una gran "mousse de chocolate". En 1991, Irak realizó un vertido deliberado en el noroeste del Golfo Árabe, vertiendo entre 500.000 y un millón de toneladas de petróleo bruto de Kuwait. En 1992, el Mar Egeo embarrancó a la entrada de la Ría de la Coruña con casi 80.000 toneladas de crudo, se rompió y explotó, liberando casi la totalidad de su carga, que afectó a unos 200 Km de costa. En el 2002, el temporal de mar y viento rompieron el Prestige y dispersaron el crudo por todo el Cantábrico, llegando hasta Francia. La dificultad de confinación y recogida del famoso chapapote por su alta viscosidad suelen convertir las playas en dramas ecológicos. En 2010 la rotura de un oleoducto de BP en el Golfo de México vertió 4,9 millones de barriles. Los trabajos de limpieza costaron más de 6.100 millones de dólares.

A pesar de la gran difusión que dan los medios de comunicación a los vertidos accidentales de crudo, la contaminación marina debida a estos vertidos se cuantifica aproximadamente en un 25% de la contaminación total por hidrocarburos que llega a esta agua. Otro 25% se debe a vertidos rutinarios por limpieza de tanques y aguas de lastre y de sentinas. Pero lo más sorprendente es que el 50% tiene origen terrestre, a través de la contaminación de ríos y del lavado de pavimentos (Redondo y Platonov 2009).

El fenómeno de dispersión es uno de los procesos más importantes en el océano, pues además del efecto de la contaminación también influye en las características físico-químicas y, consecuentemente, en las biológicas del agua marina. Ésta se refleja en la distribución y transporte de las sustancias disueltas, esenciales para la vida marina tales como sales minerales, CO₂, oxígeno, materia orgánica, nutrientes etc., así como en la transferencia de calor. El equilibrio de los mares depende de estos movimientos que alimentan este complejo ecosistema.

La limitación básica de los experimentos de laboratorio es que no resulta fácil extrapolar sus resultados a respuestas en el medio natural. Es particularmente difícil para el caso de hidrocarburos, pues sus propiedades físicas no se pueden simular adecuadamente y en la zona costera intervienen multitud de procesos, difíciles de simular. Los procesos de dispersión en el océano tienen una gran complejidad, pues se suman efectos a diferentes escalas. Los experimentos tratan de aislar estos efectos para caracterizarlos y modelarlos numéricamente.

La turbulencia puede ser idealizada como una variedad de diferentes tamaños de remolinos. Estos remolinos se comportan de diversas formas en función de las escalas a las cuales hay un aporte de energía y donde ésta se disipa. El espectro turbulento representa la magnitud de la contribución de cada longitud de onda (k) o frecuencia de los remolinos superpuestos a la energía cinética ($E(k)$) turbulenta total (Stull, 1950). En los procesos atmosféricos, por ejemplo, mientras los mayores remolinos 3D tienen de

100 a 3.000 m de diámetro, los pequeños están en el orden de pocos milímetros de diámetro.

1.2 PLANTEAMIENTO

Inicialmente, este trabajo se planteó como tesina de especialidad (Díez, 1998) para la titulación de Ingeniería de Caminos Canales y Puertos, participando en las campañas de campo de Delta'96 para obtener los coeficientes de dispersión turbulenta de las manchas vertidas (Díez, 1998) y confirmar la aplicabilidad de la metodología y las conclusiones obtenidas a partir de unos pocos casos analizados en Delta'93 por Rodríguez (1997) y Bahía (1997).

Las imágenes de vídeo ofrecieron información sobre el medio no detectada inicialmente, como por ejemplo una corriente de retorno, y permitieron caracterizar los coeficientes de difusión. Al ser campañas de campo muy completas se pudo disponer de información de los agentes forzadores y de los distintos procesos que se estaban desarrollando.

Se profundizó en la caracterización hidrodinámica de oleaje de los tests, desarrollando nuevas aplicaciones digitales de imágenes para obtener parámetros del oleaje como dirección incidente, altura de ola y frecuencia, caracterizar la zona de rotura con el run-up y set-up. También se pueden obtener espectros de energía, comparar los datos obtenidos con imágenes y con los espectros obtenidos de los sensores y correntímetros.

Vistas las grandes posibilidades de la técnica de análisis digital de imágenes para el estudio de la difusión lagrangiana en el océano y la necesidad de este tipo de estudios aplicado a las zonas costeras, playas confinadas y puertos, se decidió usar dicha técnica para comprender mejor los procesos de difusión cuando existe una múltiple interacción de escalas y de agentes forzadores y para poder caracterizar de forma predictiva los factores que intervienen en la difusión.

Se participó activamente en la logística, preparación y desarrollo de los experimentos de campo, así como en el postproceso e inventariado de los tests.

En la Universidad de Delft desarrollaron paralelamente esta técnica, comercializando sus aplicaciones mediante el sistema Argus, actualmente implantado como sistema de seguimiento en diferentes lugares de todo el mundo, también en España.

La consultoría Alatec-Haskoning y la Autoridad Portuaria de Barcelona se mostraron interesadas en este estudio para caracterizar la hidrodinámica interior del puerto y validar los parámetros empleados en los modelos numéricos de predicción de dispersión de contaminantes. Las campañas realizadas en el interior del puerto son un escenario representativo de aguas someras e intermedias sin rotura, con una mayor influencia de viento y corrientes que del oleaje y con la interacción entre masas de aguas de diferente temperatura y salinidad, como aguas interiores, exteriores y la pluma del delta del Llobregat, en diferentes condiciones meteorológicas características.

Paralelamente, se colaboró junto con Maria Ozilea Bezerra en el análisis de las campañas de Vilanova, una zona costera confinada por dos espigones que se

caracterizaba por el oleaje y las corrientes inducidas por las condiciones de contorno (Bezerra 2000 y Bezerra et al. 1995, 1998 y 1999).

Posteriormente se trabajó con el análisis de imágenes de satélite tipo SAR, para estudiar la turbulencia característica a gran escala y analizar la contaminación del Mediterráneo Occidental (Redondo et al., 2009).

La gran cantidad de datos experimentales a escalas y ambientes diferentes permiten poder aplicar la teoría de la turbulencia en zonas costeras y analizar su variabilidad. Sin embargo las escalas de turbulencia se pueden extender por ambos extremos tanto temporalmente como espacialmente. Se estudian los conceptos de intermitencia y no-dependencia al aplicar las teorías más clásicas de la turbulencia en el mar.

Este trabajo se centra en la escala de los efectos que se pueden observar o percibir. Para su análisis se ayuda de trazadores naturales o vertidos y de herramientas digitales. Se puede decir que se trata de un trabajo basado en la observación y en experimentos de campo.

La ayuda de imágenes de satélite, gracias al proyecto europeo Clean Seas, permitió ampliar el estudio a mayores escalas (Jolly et al., 2000). En estos casos, las trazas de contaminación o plancton resultaron trazadores que permitieron estudiar la vorticidad, intermitencia y filamentación a gran escala. El análisis fractal resultó ser una técnica efectiva para discriminar entre contaminación y otros flotantes, haciendo un análisis del contorno de las manchas de crudo u otros tensioactivos.

Así que la estructura de la tesis sigue el desarrollo del trabajo, organizado del siguiente modo:

- Capítulo 1. Introducción, planteamiento y objetivos.
- Capítulo 2. Se empieza con una revisión de los antecedentes y del estado del arte. Se resumen experimentos de campo previos, el desarrollo de los tratamientos de imagen y la evolución de la teoría de la turbulencia.
- Capítulo 3. Se hace un análisis de la contaminación por hidrocarburos, los principales accidentes y fuentes de contaminación, sus efectos, sistemas de limpieza y prevención.
- Capítulo 4. Se resumen los principales conceptos de la teoría de dispersión costera y el efecto de la turbulencia.
- Capítulo 5. Se explica el tratamiento digital de imágenes, sus funciones y principales aplicaciones hidrodinámicas. Se indican las posibilidades del programa DigImage, en particular, cuyas funciones básicas se pueden desarrollar con otros programas.
- Capítulo 6. Se describen los experimentos realizados y la metodología empleada. Los del Delta del Ebro (Delta'96) con un gran despliegue instrumental de medidas simultáneas; los del puerto de Barcelona centrados en la dispersión y efecto del viento; las imágenes satélite de Radar de apertura Sintética.

- Capítulo 7. Se recogen los resultados de las campañas de campo y de las imágenes de satélite. Se presentan los coeficientes de dispersión obtenidos en función de distintos agentes forzadores, espectros de energía, parámetros de caracterización del oleaje y zona de swash, medidas de corrientes y, a gran escala, análisis fractal de medidas de contaminación y vorticidad.
- Capítulo 8. Se analizan los resultados y se comparan con los agentes forzadores. Se discuten los resultados según las teorías anteriormente analizadas.
- Capítulo 9. Se resumen las conclusiones a las que se llega, comparándolos con los objetivos y se plantean las líneas de trabajo futuro.
- Capítulo 10. Se enumera la bibliografía .

Se presentan además algunos anexos teóricos y trabajos publicados con la colaboración de otros científicos.

Anexo 1 Teoría de la turbulencia.

Anexo 2 Díez M, Bezerra MO, Mosso C, Castilla R y Redondo JM (2009) "Experimental measurements and diffusion in harbour and coastal zones." *Il Nuovo Cimento della Società Italiana di Fisica C. Geophysics and space physics*, Vol. 31 C, N. 5-6 DOI 10.1393/ncc/i2009 -10354-3 p. 843-859

Anexo 3 Tarquis AM, Platonov A, Matulka A, Grau J, Sekula E, Díez M y Redondo JM (2011) "Application of multifractal analysis to the study of SAR features and oil spills in the ocean surface." *Non-Linear Processes in Geophysics 2011*, npg-2010-123

1.3 OBJETIVOS

El objetivo principal de esta tesis, tal y como dice su título, es la caracterización experimental de los procesos de advección y difusión, en diferentes ámbitos de aguas costeras, dado que se trata de procesos de gran importancia en distintas ramas de la ciencia y la ingeniería, porque son los que controlan la dispersión de diversas sustancias (sedimentos, contaminantes, nutrientes, etc.) en los ambientes acuáticos.

A pesar de que teóricamente el estado del arte a nivel de turbulencia esté bien desarrollado, a efectos prácticos la gran variabilidad y dependencia de los agentes forzadores en la hidrodinámica costera hacen que sea necesario una caracterización experimental para ver la relevancia de estos agentes y su efecto en la dispersión. Para ello se parte de un análisis del estado del arte en teoría de la turbulencia y se pretende verificar para los casos de estudio en esta tesis. El nivel de detalle de las medidas, así como de la metodología, es más avanzado que en trabajos anteriores, ya que se consideran efectos como la intermitencia en la difusión turbulenta.

Por otro lado, se intenta buscar nuevas aplicaciones del análisis digital de imágenes en el campo de la ingeniería marítima para caracterizar parámetros hidrodinámicos y procesos de dispersión horizontal anisotrópica.

Finalmente, se analiza la contaminación por hidrocarburos, sus causas, efectos y sistemas de limpieza.

1.3.1 Objetivos Generales

Una parte muy importante de esta tesis es la obtención de medidas de campo para distintas escalas y el desarrollo de metodologías de trabajo diferentes, para cada ámbito y para la determinación de cada parámetro, que pueden ser útiles para posteriores investigaciones.

La aportación experimental al estado del arte de datos contrastados son un fin en sí mismo, ya que la dificultad de su obtención hace que sean escasos y de gran valor, así como la metodología empleada.

Por último, se cotejarán estadísticamente los diferentes agentes forzadores, para intentar establecer dependencias funcionales y explicar los fenómenos estudiados de forma estadística.

1.3.2 Objetivos Particulares

METODOLÓGICOS

- Validación y calibrado de la restitución de verdadera magnitud de imágenes de vídeo. Estimación de los errores.
- Aplicación del método de series temporales de una línea para la caracterización del oleaje. Comparación del análisis espectral de la energía por altura de ola a través de imágenes de vídeo y espectros de medidas de velocidad mediante correntímetros electromagnéticos.
- Identificación de corrientes de retorno en diferentes escenarios de la zona costera mediante análisis lagrangiano con el seguimiento de boyas lastradas.
- Caracterización de zonas de rotura y barras sumergida mediante promediado de imágenes.
- Evolución de la línea de orilla en zonas regresivas.
- Utilización de los resultados experimentales para parametrizar modelos numéricos.

CARACTERIZACIÓN DE LA TURBULENCIA

- Investigación de los procesos dominantes de difusión de contaminantes tanto en superficie como en profundidad afectados por las condiciones de contorno específicas del Puerto de Barcelona, así como de los parámetros ambientales relevantes tales como oleaje incidente, corrientes, viento, etc. mediante experimentos de campo. Éstos consisten en identificar, a través de la filmación en video, las trayectorias de boyas lastradas, así como de manchas trazadoras inocuas (Leche / Fluoresceína), que permitan caracterizar los coeficientes horizontales de difusión turbulenta en distintas áreas del puerto, así como su dependencia de las condiciones ambientales.
- Utilización de imágenes de Satélite, SAR, visible, infrarrojo, etc. para determinar de forma cuantitativa y estadística los incidentes de contaminación y la caracterización superficial del Mar Mediterráneo en las proximidades del Puerto de Barcelona y analizar su vorticidad.
- Estudio de los coeficientes de difusión a distintas escalas en referencia a las condiciones de contorno, estructura dinámica del océano y procesos de intermitencia.

AGENTES FORZADORES

- Cálculo de la relación de la difusión turbulenta a distintas escalas con el parámetro de velocidad de fricción del viento.
- Efecto del viento. Interacción entre la velocidad de fricción y la altura de oleaje.
- Calibrado de distintos métodos de medida de la velocidad en puertos para caracterizar el perfil vertical de velocidades y análisis de flujos.
- Comparación de medidas Eulerianas y Lagrangianas.
- Identificación de las corrientes en las dársenas del puerto. Generación de puntos de remanso. Caracterización de las líneas de corriente en puertos en distintas condiciones.
- Efecto de la altura y periodo del oleaje sobre la difusión en zonas confinadas y abiertas: Delta del Ebro, playa de Vilanova y la Geltrú, fuera y dentro del puerto de Barcelona.
- Efecto de la marea sobre masas confinadas como los puertos.

2 ANTECEDENTES

Se realiza un análisis del estado del arte en los diferentes aspectos tratados en esta tesis: teoría de la turbulencia y dispersión en el océano, el análisis digital de imágenes y los experimentos y toma de datos en la zona costera.

2.1 ESTUDIOS EN ZONAS COSTERAS CON IMÁGENES

En cuanto a los estudios en zonas costeras para la caracterización del procesos hidrodinámicos, a medida que las técnicas de análisis de imágenes se han desarrollado, se han aplicado a la hidrodinámica costera. Las técnicas de análisis digital de imágenes se han desarrollado gracias a las nuevas tecnologías de captación y procesado con mayor resolución espacial y temporal, desde los primeros trabajos con fotografías hasta los equipos de última generación de vídeo y estereofotogrametría y las imágenes de satélite. A continuación se describe la evolución de las campañas de campo con las distintas técnicas de tratamiento de imágenes.

2.1.1 Técnicas de Observación.

Richardson (1922) y después de sus estudios sobre difusión atmosférica con Stommel (1949), realizó experimentos observando la trayectoria de remolachas flotando para ver la difusión lagrangiana en el océano. Concluyó que los procesos de difusión dependen de gran número de factores que influyen en la distribución del contaminante. La mezcla en la región costera se origina por la combinación de la difusión turbulenta de pequeñas escalas y la variación de gran escala del flujo de velocidades medias. La escala de estudio determina las fuerzas básicas predominantes ($W=ML^2T^{-2}$).

Iribarren (1964), padre de la observación del oleaje al acercarse a la costa, formula su teoría del asomeramiento, publicada en la revista "Obras Marítimas" según la cual, al reducirse el fondo marino a profundidades menores a la mitad de su longitud de onda, disminuye su velocidad de propagación y la longitud de onda, aumentando su peralte. También analiza el fenómeno de la refracción, según el cual el oleaje al aproximarse a la costa tiende a una disposición paralela a las isobatas, variando la velocidad de propagación.

2.1.2 Fotografía Aérea.

Tras la 2ª guerra mundial algunos investigadores como Wiegel (1947) utilizaron la fotografía aérea para investigar sobre los patrones de rotura del oleaje y su interacción con la topografía. Pritchard (1956) las usó como constatación de la teoría sobre movimientos de remolinos y difusión de trazadores superficiales. Katz et al., (1965) utilizaron fotografías aéreas para ver la respuesta de la difusión de trazadores sobre las condiciones de la superficie del mar. Posteriormente Harris y Umbach (1972) analizan fotografías aéreas para analizar el modelo de circulación y Ozmidov (1990) para estudiar la dispersión de trazadores.

2.1.3 Fotografía terrestre.

- Sonu (1969 y 1973), es el primero en utilizar fotografía de 35 mm en sus medidas de corrientes costeras y procesos de mezcla. Después Harris et al. (1973) y Maresca y Seibel (1976) tomaron fotografías para obtener medidas de ondas en rotura y de corrientes longitudinales con boyas y fluoresceína.

- Bradshaw (1979) aplicó esta técnica para ver el comportamiento de la zona de “swash” en playas.
- Hull et al. (2002) analizaron la rotura del oleaje y las presiones de impacto en un dique vertical mediante fotografía con flash secuencial.

2.1.4 Fotografía Estereoscópica.

- Sasaki, Horikawa y Hotta (1976) emplearon los principios de la estereoscopia con imágenes tomadas con dos globos y cámaras de 70 mm para cuantificar el campo 3D del flujo en la zona de “surf”.
- Holman y Sallenger (1985) usaron secuencias temporales de fotografía para analizar series de oscilaciones en la zona de “swash”. Holland et al. (1995) también las emplearon para tomar mediciones de ondas “run-up” y Carlson (1985) en playas disipativas.
- Tsubaki y Fujita (2005) lo aplican en Japon, a olas de pequeña amplitud y para analizar cavitaciones por cambios del fondo en un canal, con una gran precisión. La desviación estándar de las medidas era de 0,015 cm, pero con escasa resolución temporal, 12 Hz.
- Hilsentein (2005) reconstruyó la superficie del oleaje con cámaras termográficas y visión estereoscópica.
- Wanek y Wu (2006) emplearon tres cámaras para resolver la reflexión especular que produce el agua para tomar medidas en un lago. La calibración con instrumental (wave gauge) ofreció diferencias inferiores a 1 mm para oleaje significativo de 20,82 cm.
- Benetazzo (2006) empleó un método que aplicaba un algoritmo a imágenes estereoscópicas de la superficie del oleaje.
- Iglesias et al. (2009) lo emplearon en un canal para analizar el comportamiento de manchas de aceite.

2.1.5 Imágenes Promediadas.

Las fotografías con largo tiempo de obturación resultan muy útiles para identificar características geométricas no visibles aparentemente. Con el desarrollo del vídeo, se obtiene la misma información haciendo un promediado de las imágenes. A continuación se citan algunos trabajos:

- Hotta et al (1980), aplicaron fotografía con largo tiempo de obturación, para analizar procesos en movimiento como el oleaje en zona costera.
- Wijnberg y Holman (1997) presentan características cíclicas de la rotura de barras
- Janssen (1997) analizó la variación del nivel intermareal de playa.
- Knaapen (1997) estimó batimetría a través del promediado de la rotura del oleaje.
- Díez (1998) estudió la rotura de barras y corrientes de retorno.
- Aarninkhof (2003) presenta su tesis basada en la cuantificación de la batimetría de barras costeras.

2.1.6 Vídeo.

Holman y Sallenger (1985) fueron los pioneros en grabar con vídeo los experimentos costeros. A partir de entonces, numerosos investigadores emplean imágenes de video

para estudiar la hidrodinámica costera. A continuación se nombran algunos por orden cronológico:

- Hesselink (1988) presentó una descripción de la técnica de utilización de vídeo en flujos con procesamiento digital de imagen.
- Lee et al. (1989) determinaron velocidades y coeficientes de mezcla de trazadores.
- Lippman y Holman (1989) lo aplicaron para obtener una cuantificación de barras de arena basada en la disipación de la energía del oleaje.
- Aagaard y Holm (1989) estudiaron el “run-up”.
- Holland et al. (1991) caracterizaron la rotura y la calibraron de rebase.
- Lippman y Holman (1991) caracterizaron la rotura: aceleración y ángulo.
- Lippman y Holman (1992) analizaron la longitud y el periodo a una escala de tiempo asociada a la rotura del oleaje.
- Lippman, Holman y Hathaway (1993) estudiaron el comportamiento del flujo en sistemas de barras dobles.
- Walton (1993) hizo mediciones de ondas de “run-up”.
- Kuriyama y Ozaki (1993) presentaron la comparación entre datos de modelo numérico y datos de campo de corrientes longitudinales delimitadas por trazadores en la superficie del mar.
- Redondo et al. (1994) revisaron los procesos costeros: velocidades horizontales, mezcla, ángulo de rotura, periodo, “run up”, longitud de la zona de “surf”, morfología, etc.
- Medeiros et al. (1996) estudió la dispersión turbulenta en playas confinadas.
- Rodríguez (1997) continuó con el estudio de la hidrodinámica en Zona de Rompientes.
- Bahia (1997) hizo un estudio numérico experimental de la dispersión.
- Bueno et al. (1997) lo usaron para obtener las curvas de nivel de una batimetría de modelos reducidos de fondo móvil a medida que este se va llenando o vaciando de agua.
- Díez et al. (2001) estudiaron la dispersión en el puerto de Barcelona.
- Jensen et al. (2003) midieron el run-up de una playa con un oleaje oblicuo.
- García et al. (2003) emplearon el tratamiento por color para modelos a escala.
- Hequan et al. (2004) tomaron medidas de oleaje con refracción.
- Yao et al. (2004) presentaron una técnica de seguimiento secuencial de perfiles de oleaje basada en la adquisición automática de imágenes.
- Erikson et al. (2005) calibraron el sistema en un canal de oleaje.
- Osorio (2005) desarrolló la metodología de vídeo para el análisis costero, en 2006 realizó el seguimiento de dragados y en Osorio et al (2007) y Ortiz (2008) presentaron la caracterización de variables ambientales en zonas costeras.
- Holman y Stanley (2007) presentaron la historia y capacidades del sistema ARGUS como sistema comercial para la gestión costera.
- Jiménez et al. (2007) emplearon las imágenes para obtener indicadores para la planificación de la temporada de baño.
- Kroon et al. (2007) también presentaron un sistema de gestión costero basado en el tratamiento de imágenes.
- Medina et al. (2007) lo aplicaron a la gestión de la navegación de un canal.
- Salmon et al. (2007) lo usaron para medir el run-up de playa.
- Archetti (2008) monitoreo el oleaje de una playa, zona de swash.
- Ibañez et al (2007) y Iglesias et al. (2009) lo aplicaron en un canal de oleaje.
- Damiani y Mofetta (2008) monitorearon la playa en Alimini.

2.1.7 Imágenes de Satélite.

- Lichtenegger (1993) analizó vertidos de crudo en la costa gallega con imágenes SAR de la ERS1
- Martínez-Benjamin (1995) presentó estudios oceanográficos con sensores de microondas instalados en satélite.
- Marrasé et al. (1997) analizaron la turbulencia a través del plankton.
- Dalrymple, Kirby, Kennedy y Chen (1998) lo aplicaron para obtener batimetrías.
- Flores et al. (1998) estudiaron el comportamiento de vertidos de hidrocarburo en un tanque.
- Gade y Redondo (1999) analizaron la contaminación marina mediante imágenes de satélite del radar de apertura sintética SAR.
- Arnau (2000) estudió la variabilidad a mesoescala de la circulación en la plataforma continental catalana.
- Platonov (2001) analizó la contaminación marina y estudió la vorticidad.
- Dankert et al. (2003) se dedicaron a la detección de grupos de olas.
- Grau (2005) procesó secuencias de imágenes Meteosat.
- Platonov (2008) hizo un análisis multifractal de observaciones de remolinos, vertidos oleosos y trazas naturales en la superficie oceánica.
- Redondo et al. (2008) mediante análisis fractal estudió inestabilidades baroclínicas.
- Platonov et al. (2009) hicieron un análisis multifractal de observaciones de remolinos, vertidos oleosos y trazas naturales en la superficie oceánica.
- Matulka (2009) analizó el efecto de la estratificación y la rotación, destacando la relevancia del radio de deformación de Rossby como escala a la cual la estratificación y la rotación están en equilibrio.
- Pérez Marrero et al. (2009). Lo aplicaron para la predicción operacional de las trayectorias de objetos a la deriva en alta mar.
- Tarquis et al. (2011) usaron el análisis multifractal para caracterizar manchas de distinta vejez, relacionarlas con la difusión costera y a gran escala, así como estudiar la pluma de desembocaduras.
- Lee-Lueng et al. (2010) también analizaron la dinámica a mesoescala de los remolinos mediante altimetría de satélite con doble antena (SWOT). Establecieron una simulación de las observaciones a varias escalas validando la teoría de la cascada de energía.

2.2 EXPERIMENTOS EN MAR ABIERTO Y EN LA COSTA

Okubo y Ozmidov (1970) y Okubo (1971), compararon un gran número de experimentos de diferentes investigadores y concluyó que existe una dependencia de la escala espacial (ℓ) con el coeficiente de difusión (ley de los 4/3) siguiendo los razonamientos de Richardson (1922) y Kolmogorov (1941). El coeficiente de difusión no solo depende del fenómeno de escala (ℓ) (escala de los remolinos), sino también de otros factores, como por ejemplo de la escala del tiempo, de la velocidad de la corriente y de otros factores locales como el oleaje o el viento, además de la posible variación temporal y espacial del coeficiente.

Zeidler (1976), teniendo en cuenta los distintos procesos que generan energía a multiescala, concluyó que el comportamiento de la turbulencia costera, y por tanto la difusión, depende de por lo menos dos rangos diferentes, espaciados por bandas de input de energía: por un lado las ondas de viento (sea) y el mar de fondo ("swell"), que

tienen una escala de longitud característica del orden de unos 10-100 m; por otro lado, las mareas, que algunas veces se incluyen en el rango de oscilaciones inerciales cuya escala varía entre 1 Km – 10 Km. Además, existen otros tipos de fenómenos que pueden tener escalas menores que 1 Km, tales como las corrientes longitudinales o de retorno.

La difusión horizontal de trazadores en la superficie del océano es usualmente interpretada en términos de una difusión turbulenta. Otros factores también son atribuidos o están relacionados con el mismo efecto. En la mayoría de los estudios de difusión, se apunta a la escala del fenómeno (ℓ) como factor determinante que conduce a la difusión. A su vez, la escala (ℓ) del sistema en estudio está vinculada a la acción de los vientos, ondas y corrientes ambientales, que dará origen a remolinos. Las escalas de longitud característica de los remolinos corresponden al rango de alimentación (“input”) de la energía, escala (ℓ) que también está condicionada por las dimensiones definidas por la morfología costera.

Así, Zeidler (1978) explicó que la conducta de trazadores o contaminantes es controlada por tres grupos básicos de factores: advección, difusión y condiciones ambientales y de contorno.

Kraus et al (1982) presentaron los resultados de los experimentos de transporte de arena longitudinal. Realizaron experimentos con arena fluorescente en playas naturales y cercanas a estructuras para medir la tasa de transporte longshore a corto plazo. Con distintos colores inyectados en una línea que atraviesa la zona de surf se obtuvieron las distribuciones de la tasa de velocidad y transporte.

Según Ozmidov (1990), influye no sólo la velocidad de la corriente (V) sino que es más importante el gradiente V/L , donde L es una escala de longitud relevante como puede ser la profundidad del fondo marino, el espesor de la capa de mezcla o la profundidad de penetración de la corriente. Este mismo autor menciona que con el incremento de la velocidad de la corriente también aumenta el coeficiente de difusión. En cuanto a la escala temporal, ésta está intrínsecamente relacionada con la espacial.

Una de las dificultades básicas para comprender este proceso de difusión es el amplio rango de escalas del espectro de remolinos natural en los océanos, que normalmente hace imposible la separación de escalas del tiempo y del espacio (Bahia, 1997). Pero, en general, estas escalas se pueden establecer de acuerdo con las tablas 2.1 y 2.2:

Escala	Z. Rompientes	Mar abierto
Tiempo (s)	10^{-1} a 10^{-3}	1,0
Longitud (m)	10^{-1} a 10^{-4}	10^{-3}
Velocidad (m/s)	10^{-1} a 1,0	10^{-3}

Tabla 2-1. Escalas de tiempo y espacio en el océano (Bahia, 1997).

	Tiempo	Longitud	Velocidad
Olas	2.0 a 8.0 seg.	0.4 m a 7.5m	0.2 a 0.93 m/s
Corrientes de Marea	12 horas	1-6 ≈Kms	1 Km/h
Corrientes Superficial	300 seg.	15 a 120 m	0.05 a 0.4 m/s
Viento	2.0 a 6.0 seg	1.8 a 36.0 m	0.9 a 6.0 m/s

Tabla 2-2. Escalas temporal y espacial en las áreas de investigación.

Rodriguez (1997) realizó un estudio teórico-experimental de la hidrodinámica de Zona de Rompientes. Hizo un análisis de más de 63 experimentos en la zona costera y presentó la organización y diseño de los experimentos Delta 93 y Delta 96, para identificar los principales procesos a multiescala de oleaje, corrientes y turbulencia. También introdujo técnicas de observación y comparó los resultados teóricos, con los datos instrumentales y con los del tratamiento de imágenes para la obtención de parámetros para calibrar modelos numéricos. En el trabajo identificó la coexistencia de una corriente longitudinal (1m/s) y una corriente de resaca de 25 cm/s.

Bahia (1997), puntualizó que los fenómenos que se dan en la zona costera están dominados por alguno de diversos factores básicos. Según este autor, las mareas son una forma transitoria de movimiento del agua costera, por lo que pueden ser contempladas también como corrientes cambiando en el tiempo. A la vez presentan las propiedades del flujo regular con sus características de dispersión y movimiento oscilatorio, con una advección resultante pequeña y dispersión específica. Así, las olas de viento y el mar de fondo, las ondas internas y los “surf beats” pueden ser agrupados en otro extremo de los factores de advección, opuesto al flujo transitorio “regular”. Los gradientes de la escala temporal están intrínsecamente relacionados con la escala espacial. Una de las dificultades básicas para comprender este proceso de difusión es el amplio rango de escalas del espectro de remolinos natural en los océanos, que normalmente hace imposible la separación de las escalas del tiempo y del espacio.

Artale et al. (1997) estudiaron la dispersión pasiva de trazadores en recintos cerrados.

Bezerra (2001) comparò resultados experimentales obtenidos mediante el análisis digital de imágenes de vídeo en zonas costeras de distintas características: Recife (Brasil) tanto en zonas abiertas como cerradas con dominio de la marea, Vilanova i la Geltrú playa encerrada entre espigones que producen circulación en celdas, Delta del Ebro con predominio de las corrientes longitudinales. Correlacionando los coeficientes de difusión con el número de Reynolds asociado al oleaje, se observa su gran dependencia de la turbulencia, difiriendo varios órdenes de magnitud.

Bouguet (2004 a y b) estudió la difusión de efluentes en corrientes mmarinas.

Bezerra et al (2009) Posteriormente realizaron campañas de campo en Brasil en 2006 en el puerto marítimo de Mucuripe, con mucho viento, en 2007 en el puerto fluvial de Miramar, cerca de una terminal petroquímica y en la desembocadura del río Paracauri en Soure con distintas fases de la marea.

En los últimos años los estudios se centran en el análisis de imágenes satélite o sistemas de monitorización como ARGUS.

2.3 RESUMEN DE ALGUNOS EXPERIMENTOS DE CAMPO CON IMÁGENES

Se presentan algunos experimentos de campo de otros autores relacionados con la presente tesis como:

- Delta 93: presentados por Rodriguez et al. (1997) y Bahia (1997).
- Vilanova y Recife. Bezerra (2000).
- Sistema ARGUS: Lipman y Holman (1989) y Holman et al. (1987 y 1992)
- Seguimiento de dragados: Osorio (2006)
- Pendientes en la zona de swash: Baldock y Hughes(2006)

2.3.1 Delta 93

La campaña Delta'93 fue el primer estudio español de caracterización detallada de la zona de rompientes en el litoral Mediterráneo. El objetivo fue obtener información 3D fiable y detallada de la hidrodinámica en zona de rompientes, dispersión de trazadores y transporte de sedimentos. Se llevo a cabo en la playa de la barra del Trabucador del Delta del Ebro por el Laboratorio de Ingeniería Marítima del 12 al 17 de diciembre de 1993, dentro del marco de los proyectos de investigación sobre hidrodinámica y zona de rompientes financiados por DGICyT, el MOPTMA y el programa MAST de la UE.

Previamente se estudiaron otras playas como la de El Far, La Marquesa y Los Eucaliptus, pero se eligió la del Trabucador por varios motivos:

- Características geométricas: longitudinalmente uniforme, con barras sumergidas más estables que el resto.
- Escasa carrera de marea: marea astronómica de menos de 30 cm, por lo que el nivel medio puede considerarse como cuasiestacionario.
- Ventajas logísticas: proximidad y disponibilidad de información meteorológica.

Se diseñó un soporte común (trineo de 2.5x2.5x1.8 m) para la adquisición armónica de los diferentes sensores: 6 correntímetros con una frecuencia de muestreo de 20 Hz, sensor de nivel a 4 Hz, 3 turbidímetros, compás digital, etc. con un datalogger común para la transmisión y almacenamiento de datos. El trineo se podía desplazar mediante unos trácteles para posicionarlo a diferentes profundidades y las medidas tenían una duración de 20 a 40 min.

Se hizo una topobatimetría previa y posterior y también se pusieron trampas de sedimentos. Simultáneamente, el equipo de vídeo grababa desde un grúa con un brazo de 20 m sobre la que había 3 cámaras (una color, una en blanco y negro y una portátil). Se realizaron 12 test agrupados en 5 casos (tabla 2.3).

Caso	Fecha	Energía	Espectro	Periodo Tp	Estado	Tests
I	26/05/93	Alto	Doble	18 y 3 (s)	No permanente	
II	15/12/93	Bajo	Ancho	7,5 (s)	Q-permanente	1-4
III	16/12/93	Medio-Alto	Estrecho	6 (s)	Q- permanente	5-7
IV	16/12/93	Medio	Estrecho	6,65 y 7 (s)	No permanente	8-12
V	17/12/93	Bajo	Ancho	7,5 (s)	Permanente	

Tabla 2-3. Casos de estudio de Delta 93 (Rodriguez et al. 1997b)

2.3.2 Vilanova y Recife.

Algunos de los resultados aquí analizados corresponden a experimentos realizados por Maria Ozilea Becerra en Vilanova, en una playa de 240 m confinada entre dos espigones en Vilanova i la Geltrú, donde sólo un fuerte oleaje puede producir corriente longitudinal y entonces se forman dos o más celdas de circulación entre la rotura del oleaje (aunque éste no fue el caso durante los experimentos). La ausencia de corriente longitudinal permitió analizar el efecto de las olas en la dispersión horizontal. Las imágenes se captaron a 10 m de altura y se vertieron boyas y manchas de leche.

Experimentos parecidos se hicieron en una playa semicerrada de Olinda, no muy lejos de Recife (Brasil), con un dique artificial exento, paralelo a la orilla y también se hicieron experimentos en el puerto de Recife (Figura 2.1).

En Brasil los experimentos obedecían sobretodo a la amplitud de las mareas muertas (“neap tide”) y vivas (“spring tide”), así como también sus estados: pleamar (“high tide”), marea de reflujo (“ebb tide”), bajamar (“low tide”), marea creciente (“flood tide” o “rising tide”). Las boyas utilizadas, según el modelo de Kjerfve & Medeiros (1989), consistían en 10 boyas de 10 cm de radio.

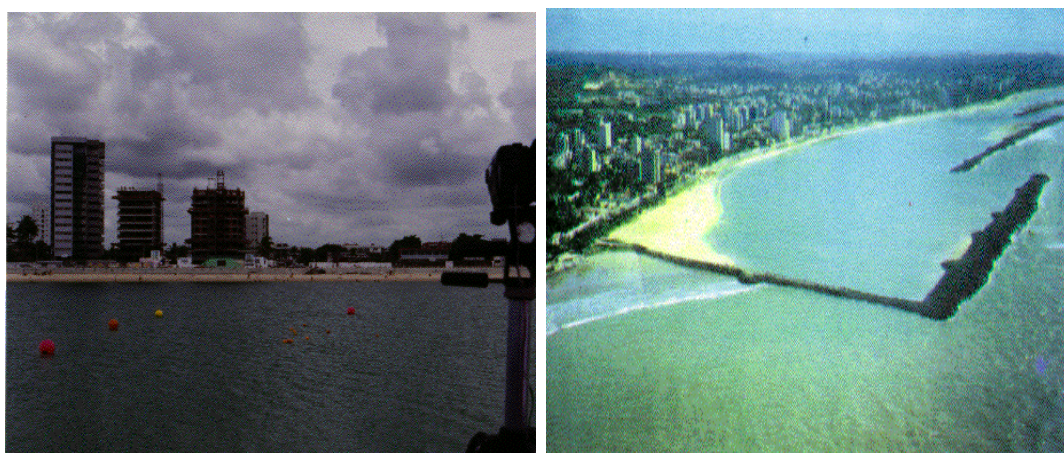


Figura 2-1. Campaña de Recife

Para estimar la evolución de los parámetros de dispersión de los trazadores en el tiempo, fueron tomadas series temporales (Figura 2.2 y 2.3) de acuerdo con la velocidad de propagación de la mancha, que era alta. Las series temporales fueron de unos 2 minutos con intervalos de 5 segundos y cuando era baja 5 o 6 minutos con intervalos de 30 segundos o 1 minuto.

Las mediciones para trazadores continuos fueran tomadas en un espacio bidimensional y en toda la extensión x e y, siendo en todos los experimentos la dirección x considerada paralelo a la línea de costa y la dirección y perpendicular. La imagen corregida ópticamente (figura 2.4) permitía determinar la evolución de las dimensiones de la mancha, por medio de un sistema cartesiano definido en el programa DigImage según la metodología de Díez et al. (1999).

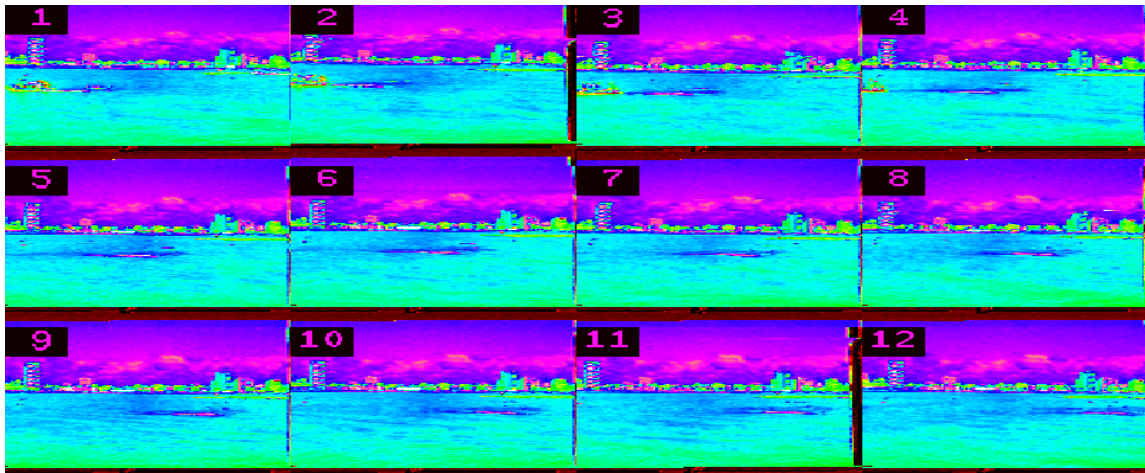


Figura 2-2. Evolución temporal de un trazador continuo. Olinda

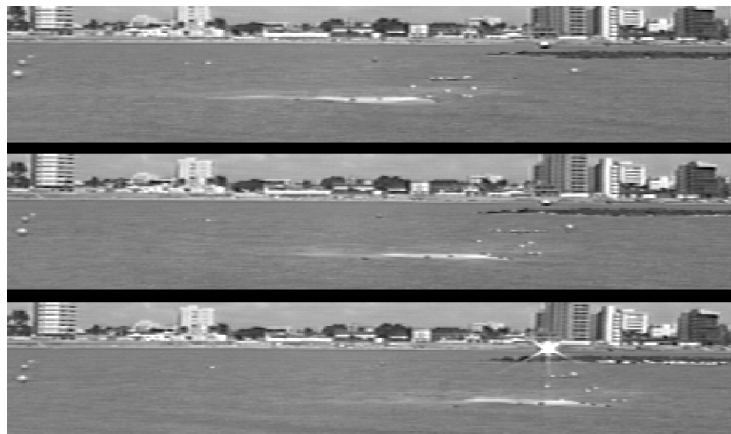


Figura 2-3. Secuencia en 3 tomas del trazador.



Figura 2-4. Manipulación de la variación de color (luz) para mejorar contraste

2.3.3 Sistema ARGUS

A continuación se hace un resumen del proyecto, experimentos y técnicas de teledetección desarrollados en el Coastal Imaging Lab de la Universidad Estatal de Oregón por la analogía con los experimentos desarrollados en este trabajo. La información se ha extraído de la web (<http://cil-www.coas.oregonstate.edu>).

El origen de ARGUS fue dar una respuesta a algunos problemas de la dinámica de olas infragravitatorias en condiciones tormentosas en la costa de Oregón. Con alturas de onda superiores a menudo a 5 m y zona de rompientes que puede llegar a 1 km de ancho, la toma de muestras con sensores tradicionales in situ se consideraba difícil.

La metodología del estudio se basaba en capturar series de tiempo de la zona de swash con ondas infragravitatorias en un tramo de playa longitudinal. En un fotograma, en un momento y ubicación de la zona de swash, se digitalizan manualmente los puntos fiduciales. Se utilizaron espectros de frecuencia de los datos resultantes para detectar y analizar onda de borde a gran escala (por ejemplo, Holman y Bowen, 1984).

Las imágenes promediadas de Argus fueron descubiertas por accidente, como parte de un estudio para detectar movimientos de ondas de borde longitudinales permanentes en una playa encajada. Para complementar los datos de swash ópticamente recopilados a lo largo de la playa, se decidió tomar imágenes promediadas de 10 minutos de la playa y de la costa utilizando una cámara de 35 mm con un filtro de densidad neutra de 13 tomas. La esperanza era que los patrones dominantes de onda estacionaria serían revelados directamente por un patrón nodal visible en la zona de swash. Mientras que los resultados fueron ambiguos, la imagen promediada (Figura 2.5) puso de manifiesto una sorprendente banda offshore de fuerte ruptura de olas que estaba relacionada con una barra de arena, lo que se demostró y se explica en Lippmann y Holman (1989). Otras investigaciones refinaron y ajustaron esta relación p. ej.; Aarninkhof et al. (2003).

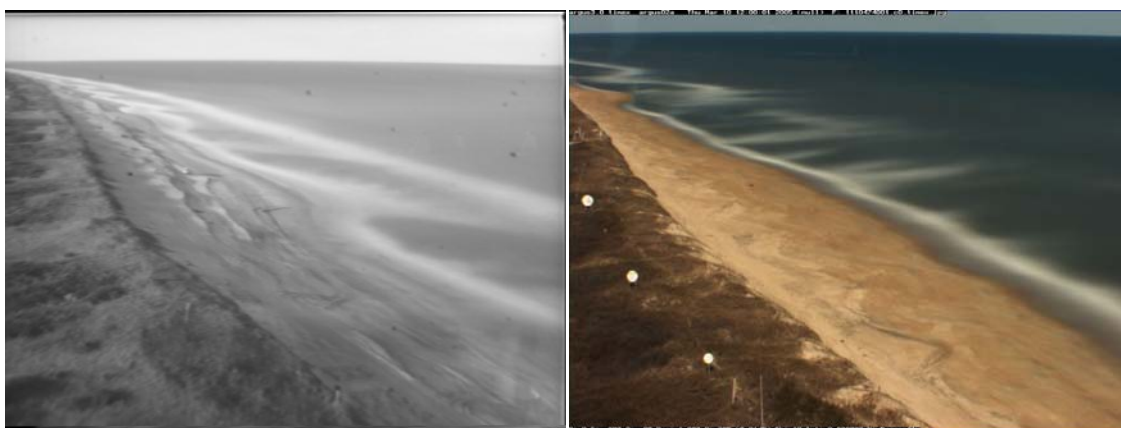


Figura 2-5. Una imagen promediada de Argus 0 y Argus III de Duck, Carolina del Norte, USA

El análisis a largo plazo de la variabilidad de la barra de arena a través de imágenes promediadas también comenzó fortuitamente al final del experimento de campo de SuperDuck en Duck, Carolina del Norte, en 1986. Se decidió dejar una de las cámaras de vídeo en la torre de observación, programada para recoger tomas diarias de 15

minutos de las ondas en la zona de surf. El valor y la necesidad de medidas a largo plazo y de bajo costo, de la variabilidad de la barra de arena, se hicieron evidentes. Argus 0 fue creado para cubrir esta necesidad con sistemas automatizados.

ARGUS I

Los tediosos procesos de captación de cintas de vídeo, envío y posterior promediado hicieron desarrollar la primera estación de Argus automatizada en 1992. Se trataba de una placa en un ordenador con DOS, situada en Yaquina Head, Oregón y conectado vía módem a la Universidad de Oregón para el procesamiento de imágenes de Dipix. Se trataba de señales analógicas de vídeo en blanco y negro de dos cámaras digitalizadas a 3,3 Hz y 640 x 480 píxeles. Las series fueron programadas cada hora.

La automatización de recopilación de datos y retorno había simplificado enormemente el proceso de toma de muestras y permitió el monitoreo continuo de lugares de interés científico sin intervención. Esta capacidad de monitoreo continua llevó a Paul O'Neil a bautizar el sistema como Argus, el perro de cien ojos de la mitología griega.

Debido a que las imágenes promediadas dan una imagen de morfología de playa sobre sólo una franja de playa (la zona de rompientes) que cambia de posición con la marea, se pensó en tomar imágenes promediadas diariamente para eliminar este efecto. Se introdujeron imágenes de variación como método para aislar a las ondas de la ruptura en la zona de surf de regiones brillantes, pero que no cambian. Estas técnicas permitieron estudiar la dinámica de barras y comportamiento de la costa a una escala mayor.

También se empezó a analizar con series temporales de píxeles a 2 Hz el campo de oleaje. Sin embargo, la tecnología de DOS no podía seguir el ritmo con las crecientes demandas de muestreo de series de tiempo y necesitaba una nueva generación de estaciones de Argus.

ARGUS II

Argus II fue diseñada en torno a una estación de trabajo de SGI O2 Unix, que tenía un entorno de computación robusto y flexible y una capacidad para digitalizar los datos de vídeo. Argus II se basó en las cámaras de color con imágenes digitalizadas en 640 x 480 píxeles a 2 Hz debido a la capacidad de vídeo de la SGI.

La limitación de Argus II radica en que SGI tenía sólo una entrada de vídeo y que podría digitalizar sólo una señal de vídeo en cualquier instante en el tiempo. Un conmutador de vídeo computarizado alternaba la digitalización de dos cámaras. Sin embargo, la sincronización no era bastante buena ($\frac{1}{4}$ de s de desplazamiento) y el análisis estéreo de las olas de la zona de surf no fue posible.

ARGUS III

Argus III se basa en las cámaras de vídeo digitales con resolución de 1024 x 768, 1280 x 960 o incluso mejor, píxeles, una considerable mejora en calidad respecto a Argus II. Todas las cámaras en un sitio están interconectadas a un equipo registrador mediante conexiones FireWire. Las cámaras captan a 2 Hz por un desencadenador

externo común para que las tomas sean verdaderamente sincrónicas y hace posible el análisis estéreo de objetivos móviles (olas) y programar series de tiempo y promediados de todas las cámaras a la vez según las necesidades.

Las principales estaciones están en: Agate Beach, Oregon; Duck, NC; Lake Erie, OH; La Jolla, CA; Black's Beach, CA; Waimea Bay, Hawaii; Noordwijk, Holanda; Palm Beach, Australia; Perranporth, UK; Teignmouth, UK; Muriwai, Nueva Zelanda; Egmond Aan Zee, Holanda; Bay St. Louis, MS; Monterey, CA; pero también en España: Santander, Barcelona (torre Mafre) y en la playa de Carchuna (Motril, Granada).

En la campaña de Duck, en enero de 1993, se instaló una cámara, sobre una torre a 44 m sobre el nivel del mar, desde donde se divisaba la playa de North Carolina. Este lugar fue elegido por el USACE para su estudio debido a sus singulares características: playa muy abrupta (pendiente 1:10) con frecuentes tormentas y huracanes. La línea de orilla está orientada a unos 340° N.

El clima de oleaje se caracteriza por alturas significantes $H_s = 1$ m y periodos de pico de 7 s. Los datos se registraron cada 3 h en una boya a 900 m de la orilla y 8 m de profundidad. La marea se medía en una estación costera cada 6 minutos. La carrera fue de 1,6 m con una media de 0,35 m sobre el nivel de referencia.

La batimetría se medía diariamente con precisión de cm gracias a CRAB, un vehículo de acero, de 10 m de alto, capaz de desplazarse sobre ruedas por la playa, equipado con un GPS. Se movía por la playa seca y la sumergida hasta calados de 5 m describiendo transectos longitudinales y transversales separados entre 20 y 60 m. Las características de la zona y la calidad de las medidas ofrecen un amplio conjunto de medidas precisas bajo distintas condiciones ambientales.

CAMPAÑA DE NOORDWIJK

En marzo de 1995 se instalaron dos cámaras en la azotea del hotel Huis ter Duin, desde donde se divisaba toda la playa de Noordwijk (Holanda). Se trata de una playa de arena orientada a 28° N. Dispone de postes longitudinalmente cada 250 m, cuyas coordenadas horizontales están referidas al sistema RD noruego y las verticales al nivel de la ordenanza holandesa, NAP. La batimetría de la zona comprende entre una y cuatro barras de arena, ligeramente oblicuas a la orilla, espaciadas entre 200 y 400 m. La batimetría se revisa una vez al año realizando perfiles de unos 800 m de largo cada 250 m. El oleaje de la zona es una composición de olas de viento y mar de fondo con alturas entre 0,8 y 1,3 m por el escaso fetch de la zona, cercana a Noruega. La altura significativa H_s y el periodo T_s del oleaje y la dirección y velocidad del viento se miden cada 10 minutos en una plataforma situada a 6 km de la costa y a 18 m de profundidad. La dirección del oleaje y su propagación se registran en otra estación a 25 km. La marea tiene una carrera media de 1,65 m y es muy asimétrica, con picos de pleamar y valles de bajamar.

Damiani y Molfetta (2008) emplearon el monitoreo webcam de la playa de Alimini (Italia) para desarrollar un modelo de gestión de zonas costeras en un entorno de MATLAB. El sistema consta de rutinas de promediado de imágenes, extrapolación, rectificación y georeferenciación. También incluye la corrección de la marea y la informatización de la pendiente en la playa.

De forma parecida se desarrollaron sistemas relacionados con la protección costera (Kroon et al., 2007), navegación (Medina et al., 2007), recreo (Jimenez et al., 2007) y otros.

A continuación se muestran algunas de las aplicaciones comercializadas por el Coastal Imaging Lab de la universidad de Oregon USA, extraídas de:

http://www.coastalwiki.org/coastalwiki/Argus_applications

EVOLUCIÓN COSTERA Y ANCHO DE LA PLAYA,

En la figura 2.6 se muestra un ejemplo de análisis de la evolución costera. En la imagen promediada y rectificada se identifican barras y corrientes de retorno que en la foto no son evidentes.

También se puede hacer el seguimiento del comportamiento de una regeneración en Florida (Figura 2.7) mediante la evolución de los perfiles transversales.

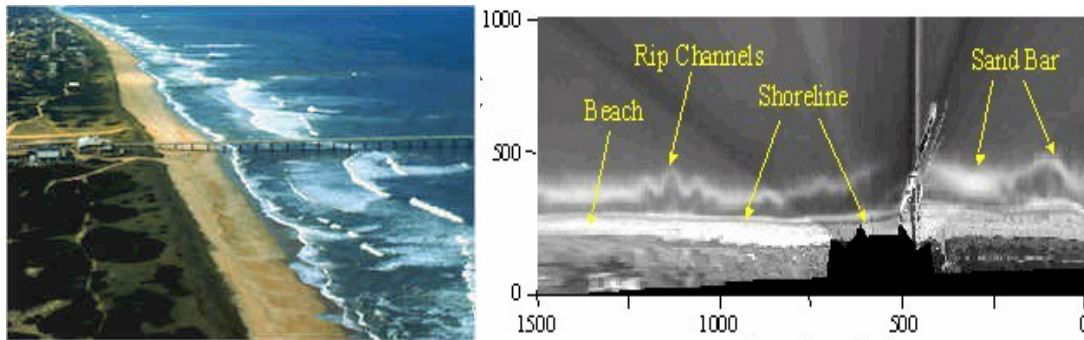


Figura 2-6. Ejemplo de imagen y resultados del sistema ARGUS. Cohen (2007)

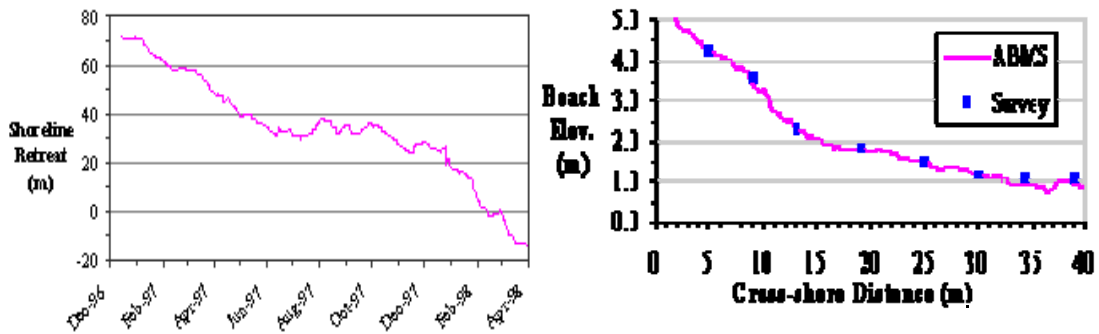


Figura 2-7. Evolución de la línea de orilla y del nivel de una playa regenerada en Florida con Argus Beach Monitoring Station. Cohen (2007)

En la Figura 2.8 se cuantifica como bascula en planta una playa, la de Bogatell en Barcelona.

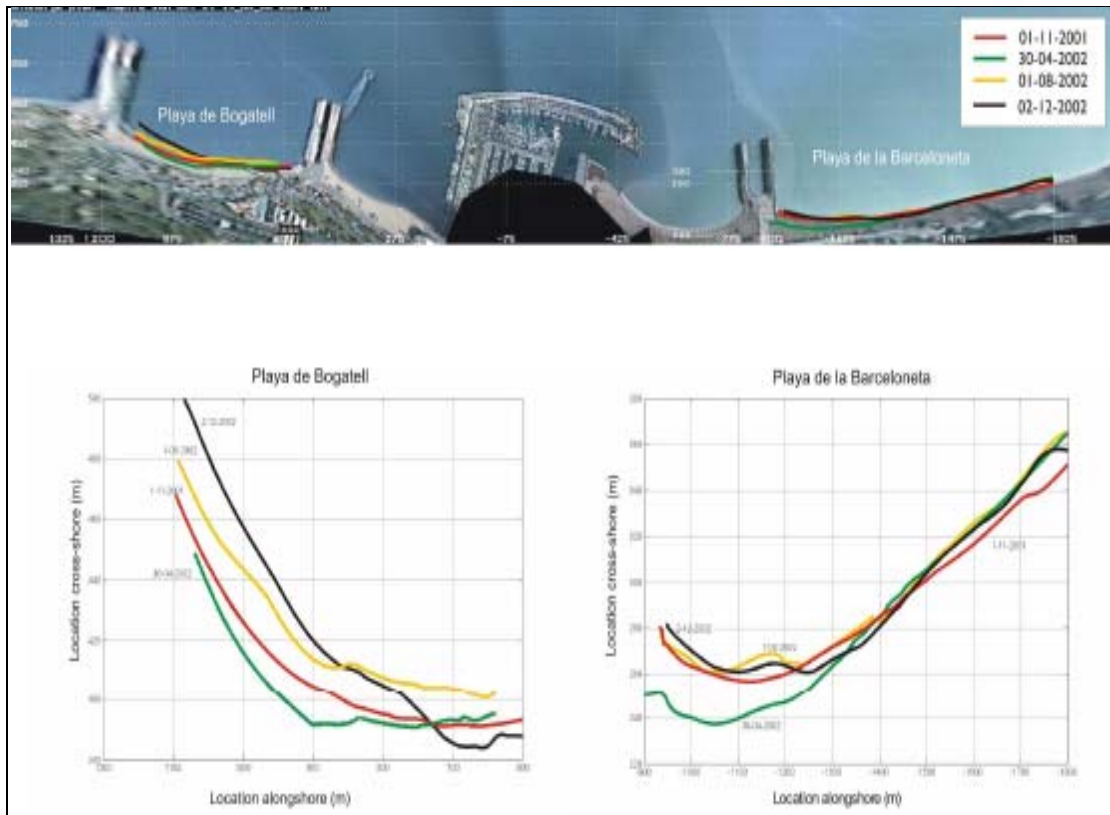


Figura 2-8 Cambios en Barcelona en las playas del Bogatell y Barceloneta. Guillen 2008.

CUANTIFICACIÓN DEL REMONTE

Remonte y rebase son dos de los mecanismos que pueden causar daño, o incluso el fracaso de las estructuras costeras. La posición del borde de resaca puede ser identificada visualmente por el cambio brusco en la intensidad entre la superficie de la playa más oscura y más clara “espumosa” del borde de la resaca. Este tipo de seguimiento obtiene información sobre el ataque del oleaje a las estructuras durante una sola tormenta o durante todo el año.

CAMBIOS MORFOLÓGICOS EN UNA PLAYA REGENERADA

En Egmond, Holanda, se determinan batimetrías de playa sumergida mensualmente en diferentes niveles del ciclo de marea (figura 2-9). La media de desplazamiento vertical es de menos de 15 cm a lo largo del 85% de la región de estudio de 2 km de ancho.

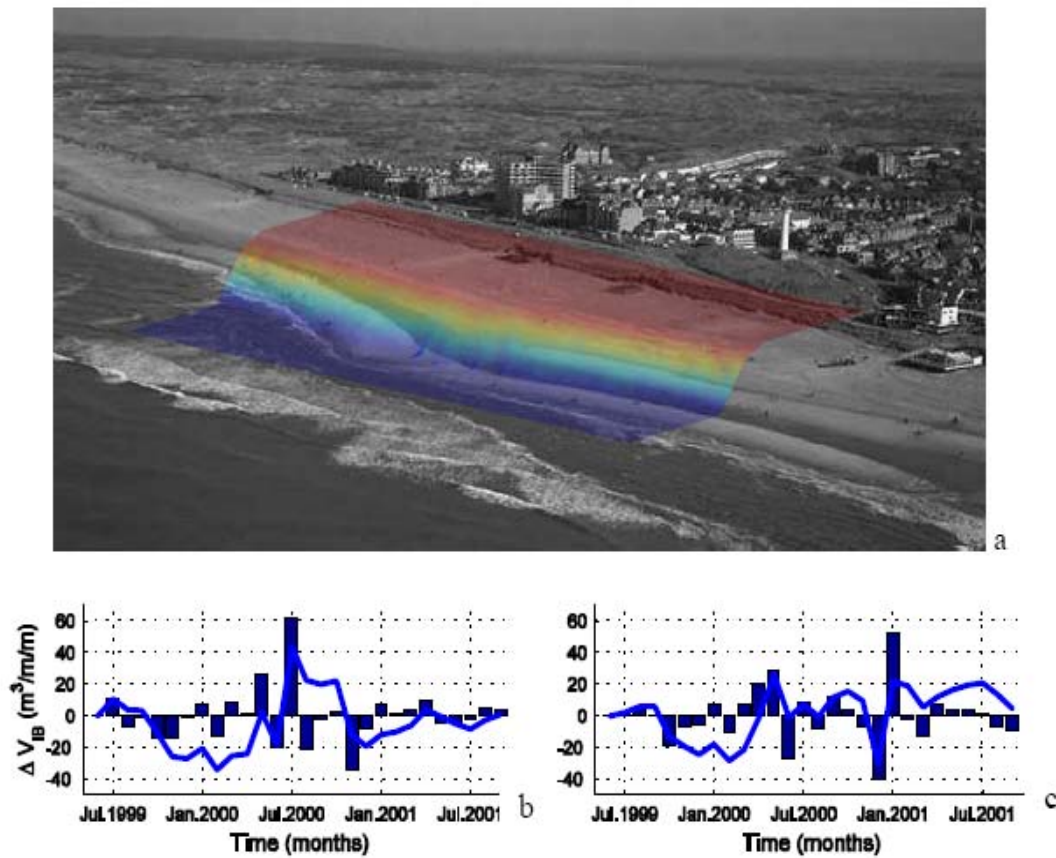


Figura 2-7 Batimetría en Egmond aan Zee según las imágenes Argus y los cambios analizados. Cohen A (2007)

MEDICIÓN DE LA BATIMETRÍA DE LA ZONA DE SURF

En Egmond, Holanda, se ha monitoreado la evolución de la zona de rompientes y su batimetría después de la regeneración de una playa en julio de 1999. La elevación del fondo es analizada continuamente según la técnica de disipación de oleaje. Este enfoque produce desviaciones marginales en el orden de 10 a 20 cm en la cara hacia el mar de las barras, que aumentan hasta 20 a 40 cm cerca de la cresta de barras. Los resultados muestran una migración hacia la costa de la barra exterior después de la regeneración (Figura 2.10), así como una acumulación neta de sedimento a lo largo de la parte superficial del perfil de playa por encima de la isóbata de 2 m de profundidad, lo que confirma el efecto beneficioso de la alimentación.

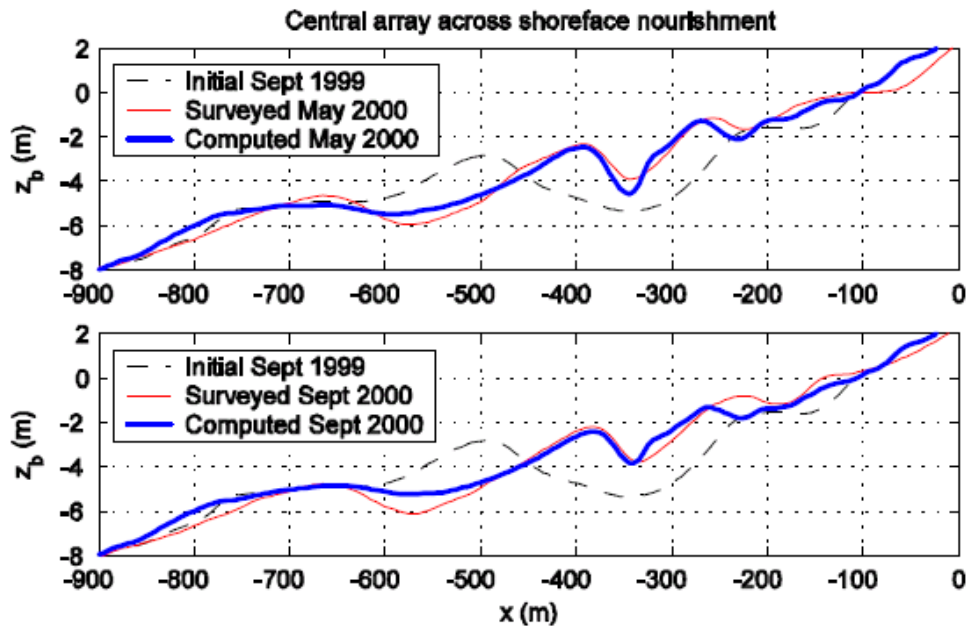


Figura 2-8. Batimetrías submareales derivadas de Argus (azul), en comparación con una batimetría medida (rojo) en mayo de 2000 y septiembre de 2000. Cohen (2007)

COMPARACIÓN DEL MODELO Y LAS OBSERVACIONES DE VÍDEO

El modelo Beach Wizard usa las observaciones de vídeo de alta resolución en combinación con un modelo morfológico 2DH para la predicción de la evolución batimétrica con una alta resolución en tiempo y espacio. El elemento clave del modelo es la actualización de la batimetría basada en las observaciones de vídeo de alta resolución Argus de la zona de rompientes. Esto se logra a través de patrones de la disipación de las olas, la celeridad de las mismas y la batimetría de la playa intermareal. Los intervalos de confianza se determinan para cada estimación batimétrica, para permitir una asimilación ponderada de las fuentes de datos diferentes y el modelo. Dada la alta resolución de las observaciones de vídeo en el tiempo, este enfoque permite el control casi continuo de la evolución de la batimetría de la zona de rompientes.

La aplicación al caso de Duck muestra que, en un corto espacio de tiempo (tormenta), el modelo es capaz de predecir con bastante precisión la batimetría, dada una secuencia de entradas a distancia observada. El modelo también es capaz de predecir el cambio de perfil con la configuración de los parámetros. La correlación es mejor para los meses de invierno, con señales más fuertes, que en los meses de verano. El comportamiento intra-anual muestra una gran variabilidad a largo plazo (décadas), por ello se calibran con perfiles topográficos en tierra.

2.3.4 Seguimiento de dragados en canales de navegación

Andrés Fernando Osorio Arias recibió el premio “Modesto Viguera 2006” por su tesis titulada “*Desarrollo de cámaras de video para hacer seguimiento de las actividades de dragado en los canales de navegación*” desarrollada en la Universidad de Cantabria y dedicada al desarrollo de nuevas técnicas, metodologías e indicadores para la utilización de imágenes de video en la gestión de las zonas costeras.

Desarrolló nuevos modelos que permitían obtener de forma automática perfiles intermareales de playa o un modelo para determinar la posición y marcos metodológicos que, aplicados al caso de la playa de El Puntal de Santander (Figura 2.11), permitieron demostrar la utilidad de los sistemas de video en la adecuada gestión de los usos de la costa: navegación, turismo... Igualmente, aplicó esta metodología al caso real del canal de acceso al Puerto de Santander. A continuación se hace un resumen de sus resultados extraído de <http://www.thecoastviewproject.org/>



Figura 2-9. Vista del Puntal. Osorio (2006)

El Puntal es una de las playas urbanas más importantes en el pequeño pueblo turístico de Somo, dentro de la Bahía de Santander (España). La evolución de la playa ha crecido, en los últimos 200 años, un 50%; así, marea y corrientes se han reducido drásticamente. Este cambio implica un estrechamiento del canal de acceso que se forma de la boca de la bahía. Por otra parte, un puerto comercial acoge buques mercantes cada vez más grandes, por lo que se necesita un canal de navegación con dimensiones mayores. Ambos efectos (mayores requisitos de canal de navegación y estrechamiento en la boca de bahía natural) no son compatibles y, por lo tanto, se requieren obras de dragado periódicamente.

El estudio es el resultado de tres años de trabajo en el GIOC, dentro del proyecto europeo CoastView (www.thecoastviewproject.org). El trabajo ha estado ligado a procesos morfodinámicos y a la interacción de playas ubicadas en zonas cercanas a vías navegables, así como al desarrollo de modelos numéricos y de modelos para el tratamiento de imágenes. El sistema consta de cuatro cámaras montadas sobre el

tejado del Hotel Real, aproximadamente a unos 90 metros sobre el nivel del mar y apuntando a la línea de costa. Cada hora, el sistema es capaz de tomar diferentes tipos de imágenes (snapshots, timex, variance) como la figura 2.12, recificarlas como la figura 2.13 y componerlas como en la figura 2.14.

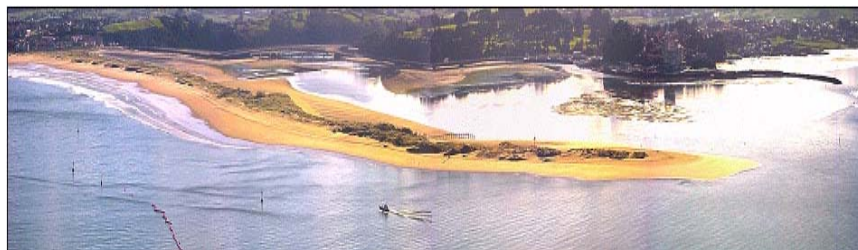


Figura 2-10. Vista Panorámica de la playa desde las cámaras del Hotel Real.

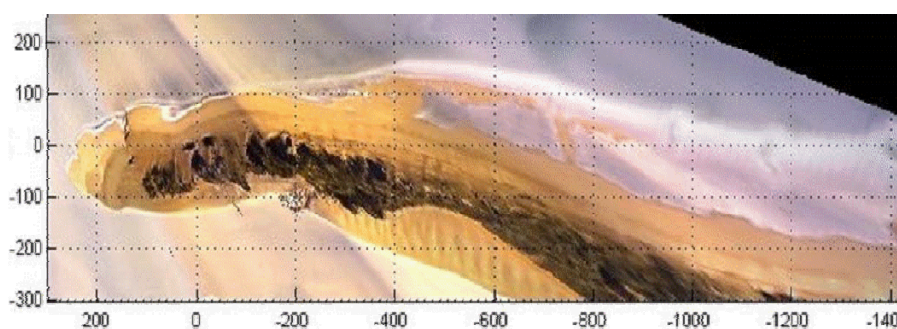


Figura 2-11. Imagen rectificada que muestra una barra de arena.



Figura 2-12. Vista compuesta de la playa de El Puntal. Osorio (2006)

2.3.5 Medida de la pendiente del agua en la zona de rotura.

Baldock y Hughes (2006) desarrollaron un sistema para obtener medidas instantáneas de la pendiente del agua con gradientes de presión horizontal en la zona de orilla. Colocaron una serie de 5 cables horizontales de 3 mm de diámetro naranjas y unas varas verticales (5 mm de diámetro) a intervalos de 5 cm (Figura 2.15), aunque podría utilizarse cualquier número y espaciado según sea necesario. No es preciso rectificar las imágenes ni orientar la cámara particularmente para tomar mediciones. Los mejores resultados se obtienen en sentido longitudinal, pero en la zona de swash de alta energía se pueden tomar fotografías en un ángulo aún más transversal. No hay ningún requisito para mantener el eje de la cámara horizontal, a menos que se desean líneas horizontales en la imagen. Las barras también permiten medir la velocidad de un frente incidente de swash a partir de registros de vídeo. En el estudio se colocaron

espaciadores a intervalos de 5 m, con barras verticales a intervalos de 1–2 m. La longitud total de los cables varió de 20 m en playas de pendiente suave a 5 m si son abruptas.

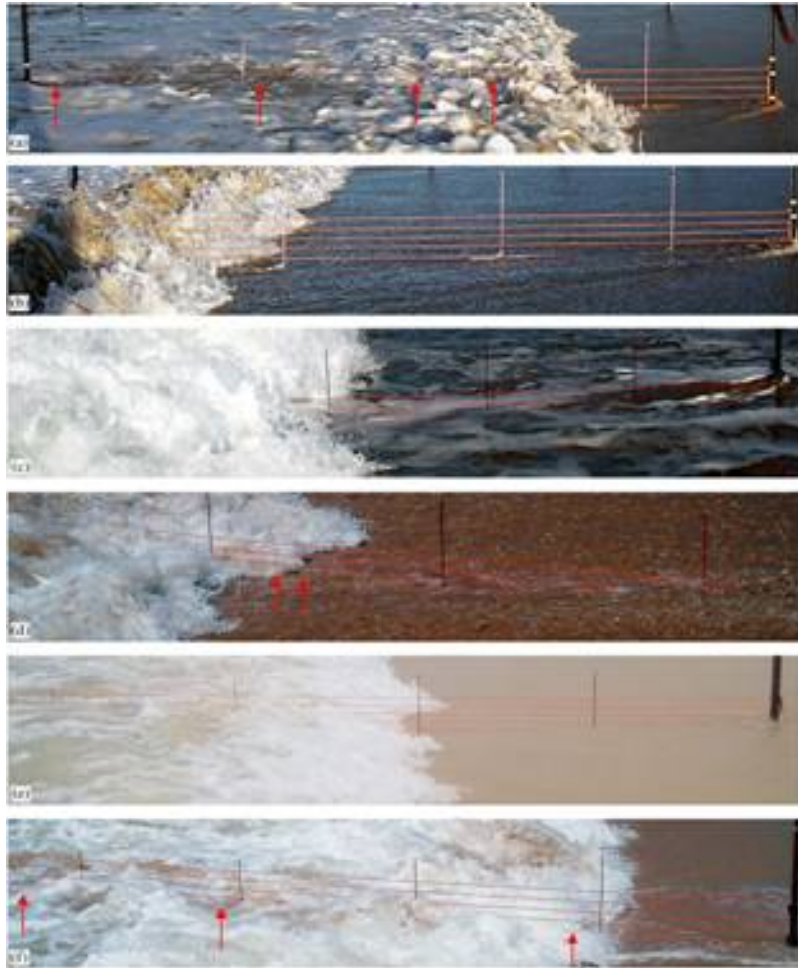


Figura 2-13 La pendiente instantánea de la superficie en el interior de la zona de surf y zona de swash. Baldock y Hughes (2006).

Mediante esta técnica se realizaron mediciones de:

- (a) Zona de surf interior y comienzo del agujero del colapso, playa de Belongil.
- (b) Voluta incidente y flujo de backwash supercrítico, playa de Belongil.
- (c) Imágenes de voluta incidente y flujo de backwash subcrítico, Ocean Beach.
- (d) Voluta incidente y flujo de backwash supercrítico, playa de Avoca.
- (e) Voluta incidente y flujo de backwash supercrítico, playa de Eagers.
- (f) Interior de la zona de voluta del colapso, playa de Avoca.

2.4 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA DIFUSIÓN TURBULENTA

Reynolds (1883) realizó los primeros estudios sobre turbulencia por descomposición de las ecuaciones de Navier-Stokes para explicar la turbulencia y caracterización del flujo laminar y turbulento.

Boussinesq (1877) introdujo el coeficiente de difusión de momentum turbulento K_m , para simplificar la Ecuación de Reynolds y la “viscosidad turbulenta” (μ_t).

çç

Einstein en 1905 estableció, en base en la teoría del movimiento Browniano, que el coeficiente de difusión D está definido por la ecuación diferencial de la varianza σ , ya que asume las fluctuaciones del flujo como regulares y, por lo tanto, proporcionales a un coeficiente de difusión constante.

$$D = \frac{1}{2} \frac{d(\sigma^2)}{dt} \quad \text{Ec. 2-1}$$

Richardson (1922) propuso que la energía se disipaba por el “fenómeno de cascada”. Definió un número que relacionaba los términos de gravedad respecto los de turbulencia y que resultó ser un parámetro de la eficiencia de mezcla. Para Reynolds la mezcla turbulenta y el transporte de momentum y calor son iguales, se difunden mediante remolinos parecidos, pero en flujos estratificados no es así debido a la presencia de ondas internas que no producen mezcla.

Prandtl (1925) clasificó el significado de las correlaciones $\overline{u'v'}$ y las relacionó con la difusión. Introdujo la teoría de la longitud de mezcla en los estudios de difusión por medio de la teoría de transferencia de momentum (lineal) por choques entre moléculas que se mueven de forma aleatoria, y definió un coeficiente de dispersión turbulento variable (K_m) en el espacio, recogiendo la variación espacial de la propia longitud de mezcla (l_m).

$$K_m = -l_m(x, y, z)^2 \left| \frac{d\bar{u}}{dz} \right| \quad \text{Ec. 2-2}$$

Taylor (1931, 1932 y 1935) describió las correlaciones $\overline{u'v'}$ y las relacionó con la difusión. Según su teoría del transporte por vorticidad $\partial/\partial t$, los pequeños remolinos tienen menor período de tiempo que los grandes.

Von Karman y Howarth (1938) buscaron diferentes “cierres” de las ecuaciones y aportó la hipótesis de similitud. Cada escala de flujo turbulento está asociada a una cierta energía, produciendo una transmisión de ésta de las escalas grandes a las pequeñas.

$$K_w = l_w K \frac{\partial w}{\partial y} \quad \text{Ec. 2-3}$$

- K_w coeficiente de transporte por vorticidad;
- K constante de Von Karman;

- l_w distancia que viaja el vórtice hasta romper;
- $\partial w / \partial y$ gradiente de vorticidad en eje y .

En lugar de tener en cuenta los cambios de momentum lineal de una capa a otra, consideró los cambios de momentum angular o vorticidad.

Estudió la capa límite atmosférica y estableció que cuando una hay frontera el flujo transfiere momentum mediante tensiones horizontales según una difusión turbulenta proporcional a la distancia a la frontera ($dU/dz = u^*/kz$). Para la atmósfera el coeficiente de proporcionalidad es $k=0,41$. En cambio en flujos estratificados o en rotación este perfil logarítmico no es válido.

Kolmogorov (1941) sugirió que la energía turbulenta (K) y la frecuencia (f) pueden ser determinadas por diferentes ecuaciones del transporte. Basado en el fenómeno de energía de cascada, Richardson (1922) propuso asumir que la disipación de energía es constante y que existe una analogía entre difusión turbulenta y molecular, pudiendo la viscosidad ser reemplazada por el coeficiente de difusión de remolinos. La teoría de Kolmogorov coincide con la de Richardson con la hipótesis de transformación de la energía de forma local a las diversas escalas.

$$D = \alpha \ell_*^{4/3} \quad \text{Ec. 2-4}$$

Prandtl (1945) describió algebraicamente la escala de longitud.

Richardson y Stommel (1948) dieron una relación empírica referida a la ley de 4/3. Richardson postuló que existe una variable independiente en turbulencia debido a las fluctuaciones del flujo; por esto no se puede precisar con exactitud la posición de una partícula, pero se puede estimar, hasta cierto punto, la separación entre partículas en un material en difusión, por la ecuación siguiente que es similar a la 2ª Ley de Fick que da una difusividad K aproximada en función de la escala de longitud (l) de la difusión de la concentración (c) de una sustancia en el tiempo (t).

$$\frac{\partial [c(l)]}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial l} \left[K(l) \frac{\partial c(l)}{\partial l} \right] \quad K(l) = \varepsilon l^{4/3} \quad \text{Ec. 2-5}$$

Goldstein (1951) y Michelson (1954) propusieron una ecuación hiperbólica que esta basada en las fluctuaciones del flujo y prevé la utilización de un coeficiente de difusión no constante.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \nabla^2 c - \frac{D \partial^2}{V^2} \quad \text{Ec. 2-6}$$

Joseph y Sender (1958) obtuvieron una relación que da los cambios de difusividad con la escala, ya que la tasa de disipación P aumenta con la distancia r .

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\text{Pr}^2 \frac{\partial c}{\partial r} \right) \quad \text{Ec. 2-7}$$

Gunnerson (1959 a, b) derivó un coeficiente de difusión horizontal según el efecto de la oscilación vertical por oleaje w . Incluía el efecto de escala del fenómeno de la difusión de Fick, con $\alpha=0,005$ para difusión sin restricción lateral y $\alpha=0,0025$ para difusión con restricción lateral.

$$\frac{\alpha (w_1 + w_2)^{4/3}}{2} = \frac{w_2^2 - w_1^2}{32 (t_2 - t_1)} \quad \text{Ec. 2-8}$$

Brooks (1960) propuso un coeficiente de difusión horizontal que no considera el efecto del oleaje. La ecuación para la concentración (c) de la línea central del eje de la dispersión de la pluma, está basada en la ecuación de difusión convencional para una línea, solo que substituye el coeficiente de difusión por la ley de 4/3.

$$\ell(x) = C_o e^{-kx} \operatorname{erf} \left[\sqrt{\frac{3/2}{\left(\frac{1+2x}{3\beta \cdot b}\right) - 1}} \right] \quad \text{Ec. 2-9}$$

A la escala del fenómeno L es definido en términos de desviación standard σ de la distribución de la concentración c .

$$L/b = \left(1 + \frac{2}{3} \beta \cdot \frac{x}{b}\right)^{3/2} \quad L = 2\sqrt{3}\sigma \quad \text{Ec. 2-10}$$

Obukhov (1949 y 1962) desarrolló la teoría estadística de la turbulencia atmosférica.

Kolmogorov (1962) propuso una nueva revisión de la K (1941), con escala indeterminada para el exponente, describiendo un modelo log-normal.

Masch (1961) a partir de una ecuación de difusión convencional, presentó una ecuación de difusión respecto la distancia s del punto de origen para coeficiente de difusión constante D y de acuerdo con la ley de 4/3:

$$c(x) = \frac{s}{4\Pi} D_o |x| = \frac{(27)u_s^2 s}{(4)^6 \Pi \alpha^3 x^3} \quad \text{Ec. 2-11}$$

Las ecuaciones son dadas con respecto a la concentración de la línea central. También definió la escala del fenómeno a partir del punto de origen de la desviación standard de la distribución de concentración para 4 tiempos, y de acuerdo con la ley de 4/3 obtiene:

$$Lx = \left[\frac{32 \alpha x}{3us} \right] \quad \text{Ec. 2-12}$$

Para una difusión con coeficiente constante una relación parabólica convencional

$$Lx = \left(\frac{32 D_o x}{us} \right)^{1/2} \quad \text{Ec. 2-13}$$

Masch (1963) postuló que el coeficiente de difusión puede ser medido por el grado de dispersión y puede ser calculado por la corriente de superficie y por la desviación standard de la distribución de las partículas.

Inman et al. (1971) definieron un coeficiente de difusión ε para una distribución gaussiana de la concentración con una varianza de la distribución del trazador σ^2 . También lo establecieron para remolinos en zona de rompiente ("surf").

$$\varepsilon = \frac{\sigma^2}{2t} \quad \text{Ec. 2-14}$$

Tritton (1989) definió el coeficiente de difusión (Kc) dependiente del fluido y de la sustancia difundida, donde la concentración (c) es dada por la masa de la sustancia por unidad de volumen y que varía continuamente en función de la posición en el tiempo t .

$$\frac{Dc}{Dt} = Kc \nabla^2 c \quad \text{Ec. 2-15}$$

Ozmidov (1990) estableció que las curvas de concentración son gaussianas o normales, por tanto son simétricas, y la dispersión puede ser obtenida directamente por un método estadístico para calcular la desviación standard.

$$\sigma^2 = 2Kt \quad \text{Ec. 2-16}$$

K es el coeficiente de difusión turbulento promedio y t es el tiempo.

La concentración decrece exponencialmente con el tiempo. esta relación ocurre solo en el caso de dispersión gaussiana.

Faber (1995) sugirió que la Teoría del Caos podría conducir a un entendimiento profundo de fluidos turbulentos en general.

Fung y Vassilicos (1998) hicieron un análisis dimensional, suponiendo que la dispersión relativa D^2 es sólo una función local de la energía espectral $E(D)$, esto es, que sólo los remolinos del tamaño de la mancha son relevantes para la dispersión D^2 . Pero para $m > 3$, los resultados experimentales no coinciden con esta fórmula teórica, sino más bien hacia la estabilización de una constante 4 - 8 en función de si la energía total se mantiene constante o sólo la energía de las escalas integrales se mantiene constante.

Castilla (2001) hizo una simulación cinemática de flujo turbulento aplicada a la dispersión de partículas en tiempos intermedios, con dos métodos numéricos:

- Simulación Numérica Directa (DNS), con la que se resuelven, de forma explícita, todas las escalas de un flujo turbulento a partir de las ecuaciones de la dinámica. Esto limita fuertemente el número de Reynolds de la simulación.
- Simulación Cinemática (KS), como la superposición de una serie de modos de Fourier, donde la única ecuación de la dinámica que se considera es la condición de continuidad. No hay malla de discretización ni extrapolación a pequeñas escalas de espacio y tiempo, lo que le hace especialmente atractivo para análisis Lagrangiano.

Realizó dos series de experimentos:

- En la primera varió la ley espectral manteniendo uniforme la energía total del campo y propuso una expresión para la función de estructura de orden p en función de la escala y de la ley espectral, para escalas menores que la microescala de Taylor.
- En la segunda varió la ley espectral manteniendo uniformes las escalas características del campo, con fuertes variaciones de energía. Observó que se

cumple la ley de Richardson generalizada, independientemente de la energía del campo, para espectros con potencia menor que 2.

Posteriormente en Castilla et al. (2007) realizan una generalización del estudio a procesos no lineales.

Matulka (2009) realizó experimentos en flujos estratificados de dos capas estables de agua salada y dulce, agitados con una rejilla y también analizó numerosas imágenes de satélite SAR. Comparó la energía potencial obtenida con la energía cinética disponible y la eficiencia relativa de la mezcla. También comparó los resultados con la simulación numérica. Concluyó que el papel del número de Reynolds, el de Richardson y de Rossby, tanto en los experimentos y en las visualizaciones del océano es muy importante para interpretar efectos antes de desconectar el comportamiento turbulento 2D y 3D. Las interacciones de ondas y vórtices dependen del nivel de enstrofia (ver anexo 1 de teoría de turbulencia). El análisis fractal de los vórtices y el análisis de la intermitencia, obtenida como correlaciones espaciales de la disipación turbulenta, permiten explicar comportamientos distintos para niveles de energía iguales y el complejo equilibrio entre la cascada directa 3D tipo de Kolmogorov y la cascada inversa 2D tipo Kraichnan.

Sekula y Redondo (2009) investigan los chorros turbulentos y los efectos relacionados con ellos, como la capa límite y el efecto de una geometría 2D. El trabajo se basa principalmente en resultados experimentales y de campo para entender los procesos de interacción que conducen a la mezcla y el transporte de masa en zonas límite y sin capas de corte. Se compara la estructura de imágenes SAR (Synthetic Aperture Radar) de los chorros costeros y vórtices y resultados experimentales de imágenes de plumas de aviones en relación al número de Reynolds. Se comparan los efectos de pared y los límites de la estructura de chorros turbulentos (3D y 2D) que no son homogéneos, el desarrollo de multifractal y técnicas espectrales.

3 CONTAMINACIÓN MARINA POR HIDROCARBUROS

En nuestra sociedad, los derivados del petróleo son la fuente principal de energía. Los accidentes con hidrocarburos han protagonizado episodios de contaminación trágicos para la biosfera y sobre todo, el océano. La complejidad de los procesos físicos, químicos o biológicos que actúan sobre el petróleo derramado en el mar, hacen difícil su estudio en laboratorio. Visto el problema y la necesidad de tomar decisiones urgentes e inteligentes sobre nuestro futuro, se han hecho numerosas campañas de campo.

La literatura de los efectos ecológicos de contaminación por hidrocarburos es muy voluminosa y han aparecido muchas revistas especializadas; en este capítulo se presenta un resumen de estos efectos.

3.1 ANTECEDENTES DE FUENTES DE VERTIDOS

En el año 1859 se perforó el primer pozo de petróleo. Desde ese momento ha aumentado la producción y demanda de hidrocarburos, como se muestra en la figura 3.1 en millones de barriles Bren (mbd), según información de la International Association of Independent Tanker Owners 2010 (www.intertanko.com).

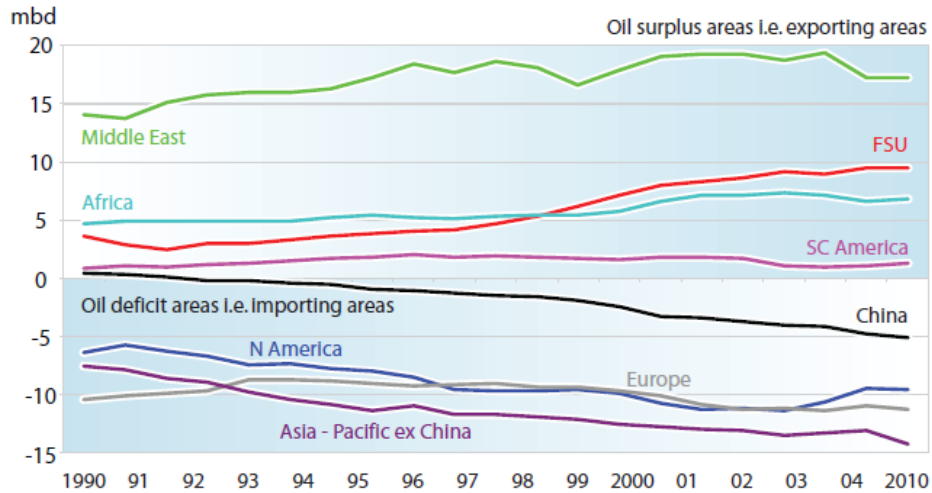


Figura 3-1. Evolución de la producción y demanda de hidrocarburos por zonas y años

Una parte de los hidrocarburos que llegan al mar es por causas naturales, a través de filtraciones de estratos geológicos (Albargés, 1980). Se estima que puede llegar al 45% del total. Los de origen antrópico pueden llegar al mar por diferentes vías, además de los accidentes. extracción, transporte, consumo. Según el Committee on Oil in the Sea III (2002): Inputs, Fates, and Effects: http://books.nap.edu/html/oil_in_the_sea en la década de los noventa las fuentes de vertidos fueron tal y como muestra la figura 3.2.

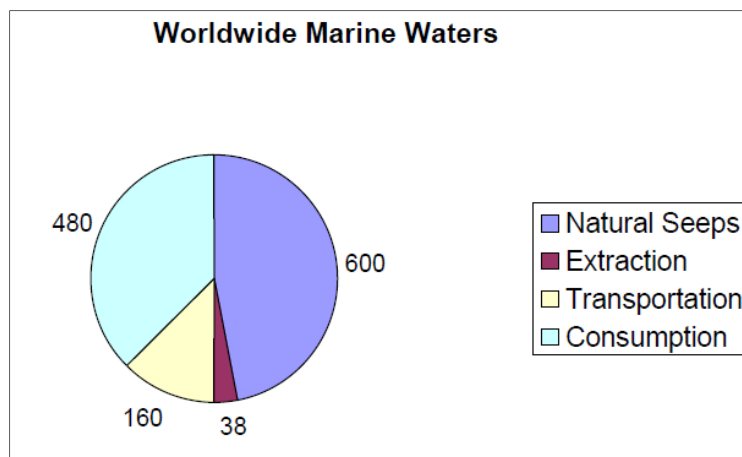


Figura 3-2. Media anual entre los años 1990-1999 de las fuentes de hidrocarburos en miles de toneladas. Oil in the Sea III (2002)

En 1920 se prohibió la descarga de hidrocarburos en aguas costeras de Europa y Estados Unidos. Después de la II Guerra Mundial, las demandas energéticas de

combustible y la necesidad industrial de derivados del petróleo invalidaron el acuerdo de paz. Enormes cantidades de crudo eran transportadas por los océanos, especialmente del Medio Oriente a Europa. En la plataforma continental se instalaron plantas de extracción que suponían el aumento de la cantidad de crudo vertido y el riesgo de un accidente de gran potencial másico. Los trabajos de Gade et al. (2006) y Redondo y Platonov (2009) ayudan a confirmar estos resultados en la zona costera europea, demostrando además la influencia de la Ley de Zipp (distribución hiperbólica entre los accidentes y su tamaño).

A continuación se citan algunos de los vertidos más importantes que ha habido debido a derrames del cargamento de barcos petroleros por accidente. Son los que han causado mayor alarma social por las graves consecuencias que se derivan de la liberación de grandes cantidades bruscamente, provocando las llamadas mareas negras.

El primer gran accidente referenciado en la bibliografía es el del petrolero Torrey Canyon, el 18 de marzo de 1967. Este barco embarrancó en una roca llamada Pollad Rock, situada cerca de las costas bretonas, en una de las Seven Stones. Contenía 119.000 toneladas de petróleo. Al embarrancar se rompieron varias cisternas y al inundarse se fue rompiendo hasta partirse en dos el 28 de Marzo y finalmente hundirse el día 30. Unas 14.000 toneladas llegaron a la costa, al Cabo Cornualles, afectando 150 km. Para eliminarlo se utilizaron 10.000 toneladas de detergentes. Posteriormente resultó que la elevada toxicidad de dichos detergentes fue la principal causa de la elevada mortalidad de flora y fauna, más que el propio vertido. Fue el primer error grave debido a la inexperiencia, pero sirvió para evitar errores posteriores.

Después de este caso, se produjeron otros menos graves. En 1974 el Peter Maersk tuvo un accidente; en 1976 el petrolero Boehlen; en 1977 el Ekofisk. La noche del 16 al 17 de marzo de 1978 el Amoco Cádiz encalló cerca del Cabo Finisterre, con 223.000 toneladas de petróleo ligero y 4.000 toneladas de fuel pesado que se vertieron en doce días. La agitación del oleaje produjo que las fracciones ligeras, de baja viscosidad, se emulsionaran dando una gran "mousse de chocolate". Después de este accidente el gobierno francés invirtió millones de francos en investigaciones para prevenir o luchar contra las mareas negras.

En 1979 se produjeron dos accidentes de petroleros, el Gino y el Ixtoc. En 1980 embarrancó el Tanio liberando 7.000 toneladas en una zona de costas que ya había sido afectada por el Amoco Cádiz. En 1983, se embarrancó el Golfo Pérsico. El 24 de marzo de 1989 un petrolero estadounidense, el Exxon Valdez, embarrancó en los peñones de Bligh, Alaska. Se vertieron 40.000 m³ de petróleo bruto, proveniente de la bahía de Prudhoe, que formaron una emulsión estable provocando menores daños que los anteriores grandes accidentes.

En 1991, Irak realizó un vertido deliberado en el noroeste del Golfo Árabe, vertiendo entre 500.000 y un millón de toneladas de petróleo bruto de Kuwait. El 3 de Diciembre de 1992, el petrolero griego Mar Egeo embarrancó a la entrada de la Ría de la Coruña con casi 80.000 toneladas de crudo. El barco se rompió y explotó, liberando casi la totalidad de su carga que afectó a unos 200 Km de costa.

El 13 de noviembre de 2002 el Prestige, con 77.000 toneladas de fuelóleo, se parte y hunde a unos 250 km de la Costa da Morte, Galicia (Figura 3.3). El derrame de petróleo del Prestige fue considerado el tercer accidente más costoso de la historia; la limpieza del vertido y el sellado del buque tuvieron un coste de 12.000\$ millones,

según [/www.wreckedexotics.com/articles/011.shtml](http://www.wreckedexotics.com/articles/011.shtml), el doble que la explosión del Challenger pero por detrás de la desintegración del Columbia y el accidente nuclear de Chernobyl (Zamora J 2003).



Figura 3-3. Accidente del Prestige

El buque frigorífico ‘Sierra Nava’ quedó varado en la bahía de Cádiz el 28 de enero de 2007 al intentar entrar en el puerto de Algeciras en medio de una tormenta, con 350 tn, afectando 10 km de costa del Estrecho.



Figura 3-4 El Sierra Nava varado en la playa.

Con la rotura de un oleoducto de BP a 1.525 metros de profundidad marina en el Golfo de México, el 20 de abril de 2010, se vertieron 4,9 millones de barriles de petróleo al mar Caribe, lo que dio lugar a una mancha de petróleo de 35 kilómetros de largo por 1,5 de ancho, que en agosto continuaba a la deriva por las aguas del golfo de México, (Figura 3.5) según datos publicados en la revista Science por la Institución Oceanográfica Woods Hole de Massachussetts. La compañía invirtió más de 6.100 millones de dólares en la limpieza y debe afrontar las demandas de más de 145.000 afectados que pueden ascender a 30.000 millones de dólares, según <http://www.informador.com.mx/>.



Figura 3-5. Imágenes de la rotura del oleoducto de BP en el Golfo de México

El pasado 10 de agosto de 2011 una fuga en una plataforma de Shell situada a 180 kilómetros de Aberdeen (Escocia), liberó al mar, según los cálculos de la empresa, 216 toneladas de crudo o 1.300 barriles, el mayor derrame en una década en la zona.

3.2 PROPIEDADES DE LOS HIDROCARBUROS

El petróleo, ya sea crudo o destilado, se trata de una compleja mezcla de hidrocarburos, moléculas de carbono e hidrógeno con pequeñas cantidades de sulfuro, oxígeno y nitrógeno, dando lugar a compuestos inorgánicos y organometálicos que varían con el tiempo, envejeciendo, tal y como describen Fernández Varela et al. (2007).

Según los enlaces entre los átomos de carbono, los hidrocarburos se clasifican en:

- Hidrocarburos alifáticos, los cuales carecen de un anillo aromático, entre ellos:
 - Hidrocarburos saturados (alcanos o parafinas)
 - Hidrocarburos no saturados o insaturados (alquenos o oleofinos y alquinos)
- Hidrocarburos aromáticos los cuales presentan estructura cíclica:
 - Benceno
 - hidrocarburo aromático policíclico (HAP)

Los alcanos son cadenas de átomos de carbono con enlaces de hidrógeno y pueden presentarse como cadenas rectas, ramificadas o cerradas. Como en muchos componentes orgánicos, a mayor número de átomos de carbono en una molécula, mayor es su punto de ebullición y menos volátil es. Alcanos de bajo punto de ebullición producen anestesia y narcosis a bajas concentraciones y a altas concentraciones pueden causar daños celulares y la muerte masiva de gran variedad de pequeños invertebrados. Alcanos de alto punto de ebullición se producen por procesos biológicos y están presentes en todos los organismos marinos. Estos derivados del petróleo no son tóxicos normalmente, sin embargo, pueden afectar a la conmutación química e interferir con procesos metabólicos.

Los alquenos no se encuentran en el crudo, son un producto de la destilación que se encuentra en productos refinados como la gasolina. Son más tóxicos que los alcanos pero menos que los aromáticos.

Los hidrocarburos aromáticos no son comunes en la naturaleza. Se caracterizan por tener cadenas cerradas de seis átomos de carbono con tres enlaces dobles C=C, llamadas anillos de benceno. Se encuentran virtualmente en todos los productos petrolíferos y son muy solubles en agua. Los de bajo punto de ebullición son los componentes más tóxicos de efecto inmediato, siendo letales incluso diluidos. Los de alto punto de ebullición, especialmente los multianulares, son venenos a largo plazo y se les llama *carcinógenos*.

El comportamiento físico y los efectos biológicos de un vertido dependen en gran medida del tipo de hidrocarburo. Dependiendo de su composición, se determinará su velocidad de dispersión, grosor de la película superficial, formación de emulsiones crudo-agua y agua-crudo, atenuación de la luz, permeabilidad del oxígeno, toxicidad y la efectividad de las técnicas de limpieza. Por ejemplo los fuel-oil ligeros contienen más aromáticos que los pesados y por tanto serán más tóxicos, pero los pesados pueden producir más daños mecánicos al hábitat intermareal por asfixia o atrapamiento.

Según la EPA (<http://www.epa.gov/emergencies/content/learning/crude.htm>) los hidrocarburos se clasifican en 4 categorías:

- Clase A: ligeros o volátiles. Son muy fluidos, a menudo de color claro, se propagan rápidamente en sólido o superficies de agua, tienen un olor fuerte, una tasa alta de evaporación y son generalmente inflamables. Penetran en superficies porosas como tierra y arena y pueden ser persistentes en esa matriz. No tienden a adherirse a las superficies; lavando con agua generalmente se eliminan. Pueden ser altamente tóxicos para los seres humanos, peces y otra biota. Productos más refinados y muchos de los crudos ligeros pueden incluirse en esta clase.
- Clase B: no adhesivos. Tienen un aspecto ceroso o graso, son menos tóxicos y con adhesión más fuerte a las superficies que los de clase A, aunque pueden ser quitados de superficies con un lavado vigoroso. Con la temperatura aumenta su tendencia a penetrar sustratos porosos y pueden ser persistentes. La evaporación de volátiles puede conducir a un residuo de clase C o D. Hidrocarburos medios y pesados de parafina son de esta clase.
- Clase C: Son característicamente viscosos, pegajosos y de color marrón o negro. El lavado con agua no es suficiente para su limpieza, pero el petróleo no penetra fácilmente en superficies porosas. La densidad de hidrocarburos de clase C puede estar cerca del agua y a menudo se hunden. La meteorización o evaporación de volátiles puede producir hidrocarburo de clase D sólidos o sustancias pegajosas. Su toxicidad es baja, pero la vida silvestre puede ser asfixiada o se ahogada cuando es contaminada. Esta clase incluye restos de combustible y crudos semipesados.
- Clase D: grasas; son relativamente poco tóxicos, no penetran en sustratos porosos y son generalmente de color marrón oscuro o negro. Cuando se calientan, pueden derretirse y forman una capa haciendo muy difícil la limpieza de superficies. Hidrocarburos residuales, crudos pesados y parafina pesada.

El medio produce alteraciones por procesos de tipo físico- químicos y biológicos (Figura 3.6 y 3.7). Los procesos físicos producen la dispersión y envejecimiento del crudo mediante la evaporación, disolución, emulsión, extensión, adsorción y sedimentación. Los procesos bioquímicos producen la transformación y mineralización del petróleo hasta convertirlo en CO₂ + H₂O por oxidación y degradación biológica.

La evaporación afecta a los componentes de bajo punto de ebullición, produciendo la pérdida selectiva de los componentes de bajo peso molecular. El índice de evaporación depende, en primer lugar, de la presión de vapor del hidrocarburo, reforzada por el viento, la rugosidad de la superficie, la alta temperatura, irradiación y superficie. Algunos componentes se evaporan lentamente, formando un residuo sobre la superficie de alto peso específico, mayor viscosidad y concentraciones de sulfuro que el crudo inalterado; incluso puede tener mayor peso específico que el agua del mar y precipitar, aunque no es muy normal.

Respecto a la disolución de hidrocarburos de bajo peso molecular, para el mismo punto de ebullición los aromáticos son más solubles que los alcanos, (Borthwick y Joynes 1989). Este proceso se complementa con la formación de emulsiones: petróleo-en-agua con la ayuda de agentes activos, y agua-en-petróleo que se produce de forma natural, dando lugar a la llamada “mousse de chocolate”, difícil de dispersar y de lenta degradación.

La oxidación química puede ser de tres tipos: atmosférica, fotooxidación o catalizada. Los requerimientos para disolver el oxígeno en el petróleo hacen que este proceso sea insignificante respecto a otros.

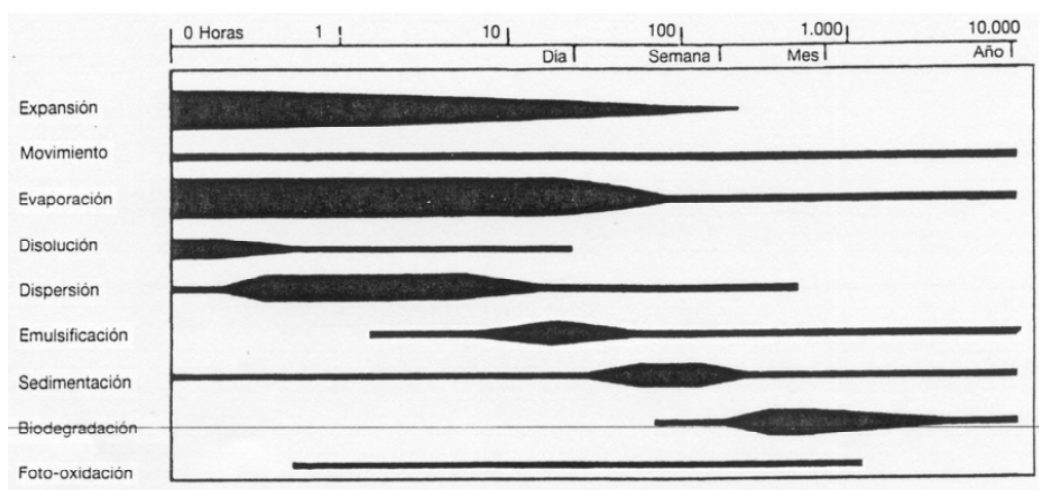


Figura 3-6. Tiempo de expansión e importancia relativa de los procesos de un derrame de hidrocarburos. Fuente: Ministerio de O. Públicas, Transportes y Medio Ambiente, 1995.

La biodegradación por bacterias tanto aerobias como anaerobias, en general, afecta series homólogas de aproximadamente en el mismo tamaño. Preferentemente atacan alcanos normales reduciendo su tamaño entre la cadena recta y ramas adyacentes. Parece haber una preferencia por los alcanos ramificados, después los ciclo-alcanos y por último los aromáticos. Junto con la disolución, la biodegradación produce un aumento relativo del contenido aromático y por tanto de la toxicidad.

Se han encontrado más de 100 especies capaces de oxidar hidrocarburos, cada una degrada una componente y en unas determinadas condiciones (pH, oxígeno, nutrientes, salinidad). Normalmente los factores limitantes son el oxígeno y los nutrientes (Solanas 2002).

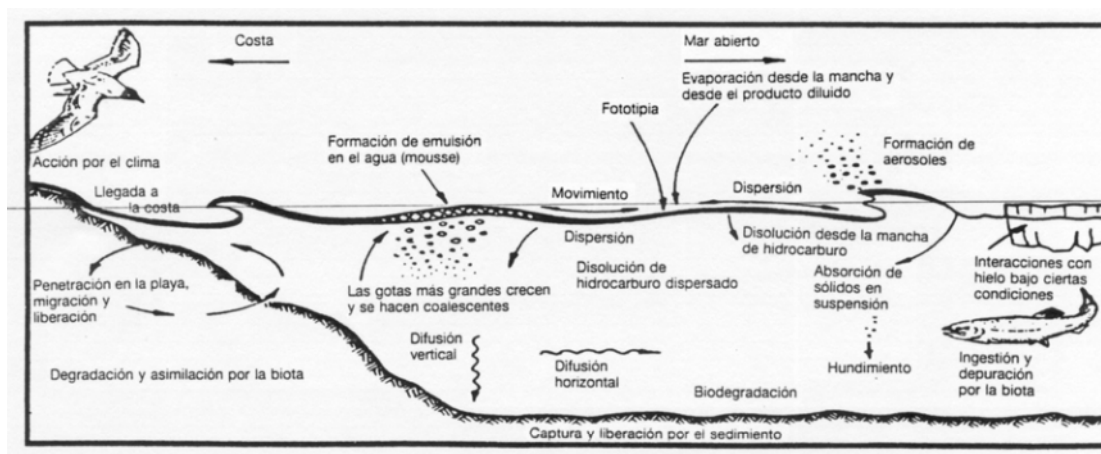


Figura 3-7. Procesos de degradación de hidrocarburos en el mar. Fuente: Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, 1995.

3.3 EFECTOS EN LOS ECOSISTEMAS MARINOS

A principios de los años 50 se hicieron algunas investigaciones para determinar los efectos sobre la pesca y piscifactorías. Entre 1950 y 1960 se estudiaron numerosos vertidos de crudo. Los estudios se empiezan a diferenciar en categorías. Los primeros son los estudios post-accidente (Boesch 1974). Estos esfuerzos sufren de una laguna en la planificación y escasa información de fondo para usar por comparación. Dos de los vertidos más estudiados son el de *Torrey Canyon* y el de *West Falmouth* pues ocurrieron frente a dos importantes centros de investigación: *the marine Biological Association of U.K.* y *the Woods Hole Oceanographic Institution*. Desgraciadamente, escasos seguimientos costeros están cerca de alcanzar la amplia diversidad de científicos y equipo necesario para estudiar correctamente un vertido.

La segunda aproximación al estudio de los efectos biológicos es experimental; se exponen especies seleccionadas a distintas concentraciones de hidrocarburos o dispersantes químicos de limpieza, en laboratorio o experimentos de campo. Se analiza su bio-asimilación y concentraciones letales para tiempos de exposición estándar (48 o 96 h). También se hacen ensayos a largo término usando concentraciones inferiores a la letal, para entender los mecanismos de estrés y su afección en la fisiología, reproducción y comportamiento. Estos efectos son muy importantes, pero en general son más difíciles de estudiar que los efectos letales. Se han fijado limitaciones de concentración por letalidad y por bioasimilación.

La limitación básica de los experimentos es que no resulta fácil extrapolar a respuestas en medio natural. Es particularmente difícil para el caso de petróleo pues sus propiedades físicas no se pueden simular adecuadamente, las especies estudiadas son un subconjunto de las potencialmente afectadas y suelen ser las más fuertes para mantenerlas en laboratorio. La principal limitación de los bio-ensayos de laboratorio es que tienen una escasa reproducción de lo que ocurre en el medio y tan solo reflejan relativas susceptibilidades de diferentes especies o toxicidad de diferentes crudos o dispersantes.

Una mejor aproximación se puede obtener a partir de experimentos de campo, delimitados en zonas intermareales o con barreras artificiales, aunque en este caso los mecanismos físicos no se reproducen fielmente por el efecto barrera. Este tipo de experimentos suele encontrarse con problemas legales por su impacto ambiental.

Muchas publicaciones de los efectos ecológicos de vertidos son más o menos observacionales, es decir, disponen de técnicas simples de estudio de la composición y abundancia de la biota comparado con situaciones de control o de base. El estudio de la persistencia del crudo en la biosfera debe abarcar necesariamente un análisis químico para evaluar sus efectos a largo término con complejas técnicas cromatográficas y espectroscópicas. El análisis de la composición de los hidrocarburos es una parte esencial de la investigación.

No existe una metodología para cuantificar totalmente el daño producido por un vertido ni manera de evaluar el coste económico para su recuperación. Por ejemplo, tras la encalladura del Amoco Cádiz, se inició un proceso judicial ante los tribunales norteamericanos. Trece años después de la catástrofe, el juez dictó sentencia y obligó a la compañía y a los astilleros a indemnizar a los pescadores, ostricultores y ayuntamientos por los gastos de limpieza y restauración, por un total de 1.000 millones de dólares. Aunque no es posible pagar con dinero la destrucción de un ecosistema, las elevadas indemnizaciones pueden inducir a tomar medidas preventivas para evitar accidentes y mejorar los sistemas de limpieza y lastre.

El petróleo puede ensuciar, ahogar o envenenar los organismos dependiendo del grado de contacto, del tipo de hidrocarburo y de la especie. El grado del impacto producido por un vertido es mayor en aquellos organismos que habitan cerca de las zonas donde se produce la mayor concentración, como en la superficie afectando a aves marinas, en el hábitat intermareal y en el fondo debido a la precipitación de los compuestos floculados.

A continuación se analizará el impacto sobre distintas comunidades. Se verá que tan sólo afectando a una especie todo el ecosistema se puede ver seriamente dañado, pues se interrumpe toda la cadena trófica. Se citan las principales fuentes:

- Moore y Dwyer (1974) estudiaron los efectos de los hidrocarburos sobre los organismos marinos.
- Neff y Anderson (1981) analizaron la respuesta de los animales marinos a los hidrocarburos.
- Neff (2002) analizó el efecto bioacumulativo de la contaminación en organismos marinos.
- <http://www.wisegeek.com/how-do-oil-spills-affect-marine-life.htm>
- http://www.amsa.gov.au/marine_environment_protection/educational_resources_and_information/teachers/the_effects_of_oil_on_wildlife.asp
- <http://www.itopf.com/marine-spills/effects/>
- <http://na.oceana.org/en/our-work/stop-ocean-pollution/oil-pollution/learn-act/effects-of-oil-on-marine-life>
- <http://oceanservice.noaa.gov/facts/oilimpacts.html>
- <http://oils.gpa.unep.org/facts/wildlife.htm>

3.3.1 Aves

Se han observado muchas muertes de aves marinas por el vertido de crudo y fuel pesado. La tasa de mortalidad se ha calculado usualmente contando el número de pájaros dañados en las playas. Pero se ha estimado que tan solo de un 5 a un 15 % de los pájaros muertos alcanzan la orilla. No obstante, eso supuso entre 40 y 100 mil pájaros en el vertido de *Torrey Canyon*.

El primer efecto en los pájaros es la impregnación de las plumas que se pegan con el petróleo, perdiendo su flotabilidad y aislamiento. El pájaro se puede hundir o perder rápidamente su calor corporal y morir de neumonía; para compensarlo aumenta su ritmo metabólico acelerando su hambre. El animal intenta limpiarse ingiriendo petróleo, veneno que hace inflamarse el tubo digestivo y desencadena otros procesos fisiológicos. Los supervivientes no podrán poner huevos o no serán fértiles.

Las especies más afectadas son las buceadoras que, atraídas por la masa flotante, aterrizan en el vertido y pueden sumergirse durante minutos bajo agua sucia. Las especies migratorias suelen viajar concentradas en grandes grupos; si sufren un accidente de este tipo se puede reducir drásticamente su población. En el Cabo de Buena Esperanza, algunas especies de pingüinos han sido extinguidas por vertidos de petroleros.

El proceso de rehabilitación es poco efectivo, debido a que es difícil capturarlos y muchos no sobreviven a los detergentes ni a la recuperación en cautividad. Generalmente no sobreviven ni el 20 % de los tratados.

3.3.2 Mamíferos

Poblaciones de mamíferos marinos han sufrido extinciones locales debidas a descargas rutinarias de petroleros, en especial algunas especies de focas están en peligro de extinción total.

El efecto sobre los mamíferos es mucho menos conocido que en los pájaros, pero no parece tan catastrófico. Comunidades de focas, leones marinos y cetáceos como delfines y ballenas migratorias pueden sufrir alteraciones como sofocaciones, deficiencias del aislamiento de la piel o envenenamiento por peces manchados, sobre todo las crías recién destetadas que no tienen reservas y no pueden alimentarse. Las nutrias marinas se redujeron hasta casi su extinción en la Costa Oeste de EEUU, debido a su caza y a que la contaminación ha destruido su hábitat.

3.3.3 Peces

Se ha comprobado, tanto en experimentos de laboratorio como en accidentes como el de West Falmouth, Puerto Rico, que el petróleo, productos derivados y sus componentes pueden ser muy tóxicos para algunas especies de peces. Sin embargo, muchas especies pueden soportarlo, como en el escape del canal de Santa Barbara, donde los peces de una zona no sufrieron alteraciones. Las escamas y una fina capa de mucus los protege y repele el petróleo. Además, los peces pueden moverse esquivando la zona.

Las larvas de peces y bancos jóvenes, que se concentran en la superficie, se intoxican o quedan atrapados produciendo una mortalidad drástica cuyas consecuencias se detectan a largo término. Sus impactos no son visibles ni fáciles de cuantificar.

También se pueden contaminar indirectamente, por ingestión de invertebrados del fango o del plancton superficial, con concentraciones significantes de hidrocarburos. Algunos peces de la costa frente a una refinería en Australia huelen a keroseno.

En las piscifactorías y cultivos de crustáceos, mejillones, almejas y ostras, los vertidos y la contaminación tienen un gran impacto económico, ya que no se puede vender la producción aunque sobrevivan.

En algunas especies se puede bioacumular persistiendo hasta llegar al consumidor, sobre todo en los tejidos grasos. Las autoridades pueden prohibir su venta en los alrededores durante mucho tiempo. Algunos peces y mariscos pueden acumular hidrocarburos, pero en pocos meses desprenderse de ellos si se mantienen en aguas limpias. Los mecanismos de limpieza son complejos y variados. El tiempo necesario para ello depende de la duración de la exposición, lugares de almacenamiento, metabolismo y estado fisiológico.

3.3.4 Organismos superficiales

El plancton, pequeñas plantas y peces transportados de forma pasiva, también sufren el efecto de los hidrocarburos, pero es mucho más difícil de medir. Experimentos en laboratorio han demostrado que varias especies son muy sensibles a los hidrocarburos, inhibiéndose su crecimiento y fotosíntesis, pero la extrapolación a condiciones naturales es cuestionable. Concentraciones de 60 a 200 ppm pueden inhibir la fotosíntesis hasta un 60 % y ser tóxicas para huevos y larvas de muchos peces como la merluza y el arenque.

Por otro lado se han de valorar los efectos a largo plazo de aceites contaminantes y grumos de alquitrán que son alarmantemente comunes en el mar. Si las concentraciones de hidrocarburos siguen creciendo, el plancton superficial puede sufrir las consecuencias y afectar a la productividad oceánica.

El *neuston* es un conjunto de organismos que viven en la capa superficial del mar. Debido a su contacto directo con los contaminantes, es difícil imaginar que no sufra efectos tóxicos o mecánicos. Se han llevado a cabo algunas investigaciones sobre el impacto de la comunidad de los Sargazos pero, en general, los organismos superficiales están muy poco estudiados.

3.3.5 Organismos intermareales

La zona intermareal es aquel tramo de orilla definido entre la pleamar y bajamar. Su proximidad a poblaciones la hacen especialmente sensible a impactos visuales, y por tanto, se le ha dedicado mayor atención.

Las grandes algas son importantes productores primarios de las costas rocosas. Algunas macroalgas y anémonas tienen una capa natural de mucosidad que las protege, evitando que el petróleo se adhiera a ellas. Aunque suelen ser resistentes al petróleo, pueden ser cubiertas y el petróleo del sustrato pasar a invertebrados

herbívoros matándolos. La falta de depredadores desencadena la colonización de las algas verdes, es la llamada fase verde. Éstas, gradualmente son reemplazadas por una cobertura marrón de algas *fucoïdes* más robustas. Si no son depredadas pueden formar una gruesa capa que impida el restablecimiento de la fauna como mejillones y percebes. En algunas ocasiones, la destrucción de estas algas ha permitido desarrollar una mayor biodiversidad.

La muerte de los animales intermareales se puede producir de muchas maneras. La toxicidad directa parece ser poco usual, pero puede producirse por fuel ligero. Hay efectos indirectos del crudo o fuel pesado que, sin ser tóxicos, resultan letales. Algunas especies móviles como caracoles se retraen en su cáscara, perdiendo su sujeción a las rocas y son transportadas lejos de su hábitat. Los moluscos pueden incrustarse en la roca manchada hasta que no aguantan más y también son transportados. Otras especies móviles se pueden cementar a la roca por hidrocarburos pesados. Otros, como los percebes, pueden ser ahogados por depósitos de petróleo.

En las zonas rocosas, el oleaje limpia rápidamente la zona batida, pero en la parte situada sobre el nivel de pleamar persiste hasta que se erosiona. Los percebes se pueden fijar a superficies asfálticas, pero se ha comprobado que su supervivencia es menor debido a que el sustrato oscuro absorbe más calor, provocando estrés y desecación. Los efectos sobre los hábitats arenosos son menos conocidos. Probablemente debido a la dificultad de tomar muestras y sobre todo a la gran variabilidad de las poblaciones, no se pueden obtener resultados concluyentes. El vertido puede perdurar en la arena o lodo durante años.

Los efectos sobre el hábitat intermareal son de débiles a moderados. Su resistencia y resiliencia se deben a: la fortaleza de estas especies, su rápida reproducción y a la relativa rapidez con la que se regenera la zona. En esta zona pueden ser más perjudiciales los dispersantes empleados en la limpieza que el vertido, por lo que se debe controlar su uso.

3.3.6 Organismos del lecho marino

Los hidrocarburos tienen distinta afinidad por las partículas de sedimento. Preferentemente forman agregados con minerales de la arcilla y turba. Su peso específico los hace precipitar cubriendo el fondo. Una de las técnicas de limpieza consiste en esparcir partículas afines para formar agregados. La precipitación impide que el vertido alcance la costa, eliminando su impacto visual, pero evidentemente desfavorece al hábitat del fondo.

En los accidentes de *Tampico Maru* y *Torrey Canyon* se produjo la muerte masiva de almejas, estrellas de mar, langostas y otros invertebrados de pequeñas cuevas. Sus efectos son arrolladores y lejos de la zona del vertido también se encontraron muchos crustáceos y equinodermos moribundos. La contaminación se puede dispersar por el fondo, arrastrada por las corrientes submarinas, normalmente de aguas someras a profundas. La ausencia de oxígeno en zonas muy profundas ralentiza la degradación de los hidrocarburos.

La persistencia de hidrocarburos en las oquedades y la reducción de los invertebrados herbívoros altera la ecología de la cueva durante años. Diez años después del vertido de Santa Barbara, la biomasa de los organismos es todavía inferior a la que había

antes del accidente. A este descenso pueden haber contribuido la lluvia ácida, otros contaminantes como pesticidas, o variaciones naturales de los niveles de población.

Los procesos de degradación, como la oxidación biológica, reducen de forma selectiva los n-alcenos, de forma que aumenta la concentración de aromáticos y cicloalcanos. Muchos organismos marinos que se alimentan de materia suspendida o sedimentos del fondo pueden bioacumular hidrocarburos en sus tejidos, produciendo efectos crónicos y transmitiéndolos a sus predadores.

3.3.7 Marismas

Las marismas son características en muchos estuarios marinos, desde los pantanos salados dominados por follaje en climas templados a los manglares de árboles en los trópicos. Tienen una gran importancia ecológica, pues son uno de los ambientes más productivos de la tierra. Sirven de hábitat, lugar de reposo, alimentación y apareamiento a gran variedad de pájaros, peces y otras formas de vida.

Son zonas muy resistentes a la contaminación. En el caso de vertidos de hidrocarburos, a menudo tan solo han sufrido daños mínimos, mitigados por la retención en las plantas. Sin embargo, la proximidad a fuentes de contaminación crónica puede tener efectos importantes, llegando a la denudación de la zona. En animales puede ser letal para moluscos, cangrejos, arenques y gaviotas. En plantas, dosis moderadas pueden no tener efectos perjudiciales, pero si se repiten pueden resultar letales, se mueren los retoños y crecen las raíces. El efecto producido depende de:

- La composición de hidrocarburo. Los componentes aromáticos son más tóxicos.
- Época del año. En la estación de crecimiento son mucho más vulnerables.
- Especies afectadas. En contacto directo con algunas plantas, el petróleo puede penetrar a través de las estomas, invadir los espacios intercelulares e impedir la transpiración. Otras, en cambio, desarrollan mecanismos epidérmicos o celulares para impermeabilizarse y se reproducen desarrollando sus raíces.

En algunos casos se ha comprobado que los hidrocarburos inducen el crecimiento de las plantas. Este hecho se puede deber a:

- Un aumento de la retención de agua en el suelo debido al aceite del petróleo.
- La liberación de nutrientes por la muerte de animales.
- Nutrición o regulaciones de crecimiento estimuladas por el petróleo.
- Fijación del Nitrógeno por los microorganismos de la degradación del petróleo.

Los estuarios son zonas confinadas y someras donde se produce poca dispersión. Además, se caracterizan por ser muy turbias. Las partículas en suspensión tienden a absorber el petróleo y precipitar al fondo. El sedimento contaminado puede ser ingerido por detritívoros. Si precipita a fondos con condiciones aerobias, la abundante biota microbiana puede degradarlo rápidamente. En cambio, si cae en zonas con condiciones anaerobias, se almacena durante mucho tiempo.

3.3.8 Regiones polares

Los yacimientos de los casquetes polares y el peligro de la navegación entre icebergs hacen que en estas zonas el riesgo de accidente sea muy alto. Además, sus efectos tienen gran impacto potencial debido a que:

- Las bajas temperaturas impiden la rápida evaporación de los hidrocarburos aromáticos, favoreciendo la disolución de estos compuestos tóxicos, aunque la solubilidad disminuye con la temperatura.
- El índice de degradación bacteriana y otros procesos de eliminación son menos eficientes a bajas temperaturas.
- La biota de las regiones polares es generalmente de vida larga, con bajos potenciales reproductivos, y no tiene una amplia variedad de formas de vida.

3.3.9 Arrecifes de coral

El ecosistema coralino se caracteriza por su gran biodiversidad y productividad. La navegación de petroleros por aguas tropicales de África y Asia ha provocado accidentes en algunos arrecifes. El recubrimiento del coral por hidrocarburos puede dañarlo seriamente; sin embargo, muchas especies se recubren de mucus para protegerse del contacto directo. Por otro lado, la muerte de los pólipos deja un esqueleto coralino que absorbe y retiene el petróleo. La degradación de un vertido es relativamente rápida, pero la recuperación de un arrecife diezmado es extremadamente lenta.

3.4 PREVENCIÓN DE VERTIDOS

Ante los problemas energéticos de la sociedad se debe asumir que:

- La sociedad es cada vez más dependiente de la energía, en un planeta sobre el que se está produciendo un cambio climático, acelerado por efecto del hombre.
- La mayoría de la población vive en zonas vulnerables.
- Todas las fuentes de energía tienen efectos indeseables:
- Los combustibles: los vertidos accidentales o ilegales en su transporte, el efecto invernadero de los gases desprendidos y el deterioro de la calidad del aire. Además de la cantidad limitada de combustible en el planeta. Sin embargo, tiene la ventaja de que se puede producir en el momento y cantidad deseada.
- La energía nuclear: aparentemente es la más inocua pero potencialmente la de mayor afectación tanto en radio de acción y letalidad como en la duración de los efectos. Los reactores se pueden regular parcialmente. Suele ser energía de base
- La eólica: su efecto visual, afección a aves y dependencia del medio, no se puede disponer en todas partes ni en todo momento.
- La hidráulica: la inundación del embalse, la interferencia en el curso de agua, el riesgo de rotura, la dependencia del medio, etc
- La solar: parece ser la más limpia, pero las placas solares tienen una duración limitada y son un residuo especial. También depende del medio y necesita grandes superficies.
- La cogeneración no es más que una combinación de combustión y hidráulica que permite regular la generación y el consumo.

De manera que la prevención y el ahorro son las mejores herramientas para la sostenibilidad

Las medidas de lucha contra la eliminación, según esto, pueden adoptar dos modalidades:

- Medidas preventivas.
- Medidas de eliminación.

Al igual que ocurre con la medicina referida al cuerpo humano, es obvio que el mejor sistema de luchar contra esta patología de los océanos es la adopción de medidas preventivas, que eviten que la enfermedad aparezca o que al menos revista proporciones reducidas y, por lo tanto, controlables. Además, se ha comprobado que los costes de los sistemas preventivos son muy inferiores a los paliativos. Con ello se lograría una doble ventaja económica; por un lado los costes de limpieza de la contaminación serían más pequeños y, por otro, el coste indirecto de los daños causados en el medio también sería menor.

La prevención de la contaminación procedente de los buques se centra principalmente en acciones que tiendan a eliminar las causas de vertidos, tanto los operacionales (limpieza de tanques, carga-descarga, etc.) como los accidentales (colisiones, explosiones, etc.).

Por otro lado, se ha desarrollado numerosa normativa internacional al respecto.

- Convenio de Londres 1972 sobre la prevención de la contaminación del mar por vertimiento de desechos y otras materias. Para la prevención de la contaminación causada por vertido de material de dragado, hundimiento de buques, etc.
- MARPOL 73/78 Convenio para prevenir la contaminación por los buques. Normas para evitar las descargas de sustancias contaminantes operacionales y accidentales de los buques.

Anexo I.- Hidrocarburos.

Anexo II.- Sustancias nocivas líquidas transportadas a granel.

Anexo III.- Sustancias perjudiciales en paquetes, contenedores, tanques portátiles y camiones cisterna.

Anexo IV.- Aguas Sucias.

Anexo V.- Basuras.

Anexo VI.- Contaminación atmosférica.

- SOLAS 74/78. Convenio Internacional para la seguridad de la vida humana en el mar. Normas sobre diseño, prescripciones contra incendios, elementos de salvamento, comunicaciones, sistemas de propulsión y gobierno, cargas, etc.
- Convenio de Barcelona 1976 para la protección del medio marino y de la zona costera del Mediterráneo. Para la prevención y lucha contra la contaminación de cualquier fuente en el Mediterráneo.
- OPRC 90. Convenio sobre Cooperación, Preparación y Lucha contra la Contaminación por Hidrocarburos. Cooperación internacional, notificación y planes de preparación y lucha contra la contaminación.
- Convenio de París 1992. Convenio para la protección del Medio Ambiente Marino del Atlántico Nordeste. Para prevenir la contaminación causada por vertidos o incineración, por fuentes mar adentro, de origen terrestre y otros orígenes.

- Directiva de la UE sobre Instalaciones de recepción. Para la provisión adecuada de instalaciones de recogida y tratamiento de residuos generados por los buques, en los puertos de la Comunidad Europea.

Legislación Nacional

- Orden 10.6.83. Normas complementarias al Convenio SOLAS 74/78. Aplicación a buques de recreo y de pesca.
- R.D, 145/89. Sobre admisión, manipulación y almacenamiento de mercancías peligrosas en los puertos.
- R.D. 438/94. Regula las instalaciones de recepción de residuos oleosos procedentes de buques.
- R.D. 253/2004 medidas de prevención y lucha contra la contaminación en las operaciones de carga, descarga y manipulación de hidrocarburos en el ámbito marítimo y portuario.
- R.D. 800/2011, de 10 de junio, por el que se regula la investigación de los accidentes e incidentes marítimos y la Comisión permanente de investigación de accidentes e incidentes marítimos.

Así mismo se han creado numerosos foros y grupos de trabajo como por ejemplo PROTECMA. <http://www.ptprotecma.es> que tiene como origen la Red Tecnológica para la Prevención y Respuesta a los Vertidos Marinos "PREVECMA", creada en el año 2006 y promovida por el Ministerio de Ciencia e Innovación para promover en España la investigación y el desarrollo tecnológico para la prevención, respuesta y minimización del impacto medioambiental y socioeconómico causado por los vertidos de hidrocarburos y de otros productos potencialmente peligrosos transportados por el mar.

3.4.1 Construcción de los barcos petroleros.

Las tendencias modernas de la construcción de buques pueden contribuir notablemente a disminuir el riesgo de contaminación. Las medidas más representativas son:

División de la carga en compartimentos estancos. Se impone un tamaño máximo (30.000-40.000 m³) a los diversos tanques de cada buque, de forma que en caso de rotura parcial del casco no se derrame todo el volumen transportado. Esta regla tiene como consecuencia un aumento del coste de la construcción y de la cantidad de acero.

Construcción de un doble casco, con un doble objetivo: proteger los tanques de impactos exteriores y disponer de tanques de lastre independientes de los de carga. El doble casco encarece entre un 30 y 40 % el coste de construcción del buque, debido a la necesidad de más material y al coste de explotación, pues requiere motores más potentes para mantener idénticas velocidades.

Separación total de la carga y lastre mediante tanques independientes, sin que se puedan admitir utilidades mixtas, separadas o simultáneas, en ninguno de ellos. Esto reduce la capacidad de transporte, ya que el lastre puede llegar a ser el 60 % del peso del buque pero es el buque menos contaminante.

3.4.2 Métodos operativos en los buques

Los problemas de vertido y limpieza de los residuos generados por la operación de carga y descarga pueden ser tratados de diversas formas. Si bien, en la mayoría de los casos, el producto resultante se termina evacuando al mar, ya que no en todos los puertos existen instalaciones específicas para su tratamiento y los que disponen de ellas cobran por su recogida. Por ello, conviene almacenar estos residuos tan concentrados como sea posible.

Uso del sistema de limpieza de tanques para separar el agua de mar como el método LOT, decantadores químicos, membranas flexibles, etc. El sistema LOT (Load On Top) consiste en almacenar el agua con los restos de petróleo. Cuando se vacía un tanque se lava con agua caliente a presión y el agua sucia se almacena en un tanque especial. Después, se llena de agua para lastrar el barco pues las paredes no están dimensionadas para soportar la presión. Para volver a cargar se vierte el agua de lastre hasta que empiezan a aparecer residuos que se envía al tanque de almacenamiento. En este tanque se van separando y es posible verter parte del agua. Los residuos concentrados que se descargan en una terminal especial. Si el tanque de almacenamiento no está lleno se puede cargar encima, de ahí su nombre. En las operaciones de carga, descarga y transbordo del material es conveniente el uso de cortinas o paneles que cubran el recorrido del material y faciliten el vertido del mismo por las escotillas.

3.4.3 Seguridad en la Navegación.

La importancia de la prevención de los accidentes durante el periodo de navegación estriba en que los resultados suelen ser catastróficos, y por tanto, las cantidades de contaminante vertidas muy elevadas. Las medidas en este aspecto pueden resumirse en:

- Procurar una buena distribución de la carga entre los tanques para evitar el riesgo de rotura por fatiga de la estructura del casco o el peligro de explosión por llenado excesivo. Para lograr la óptima distribución debe realizarse una previsión de las cargas y descargas sucesivas, así como la automatización del sistema de control de carga. Para optimizar la distribución de la carga es necesaria una racionalización, una previsión de los diversos episodios de carga-descarga y una automatización de los sistemas de control de carga.
- Establecer pasos de navegación con sentidos diferenciados que eviten choques entre barcos, sobretudo en zonas de alta densidad de tráfico como estrechos (Canal de la Mancha, Gibraltar, Malaca), cabos (Buena Esperanza, Finisterre), algunos ríos (Elba, Rin, Mississipi) y en general entornos de los grandes puertos (Nueva York, Rotterdam, Barcelona), y para evitar encalladuras en obstáculos como escollos.
- Mejora del sistema de localización y maniobra para una completa y constante identificación de la situación del buque y de los que le rodean. Los sistemas de mayor uso son los de radio señales en zonas costeras y la navegación por satélite con GPS. Es necesario conocer la posición exacta del barco y de los buques que lo rodean. Paralelamente se han desarrollado diversos sistemas Anti-Colisión para anular los errores humanos en momentos críticos, ofreciendo rutas óptimas, datos sobre distancias relativas y definiendo las maniobras necesarias para evitar el impacto.

3.5 CONTROL DE VERTIDOS

La contaminación por hidrocarburos se produce normalmente de forma súbita, debido a una emisión puntual y se dispersan por la superficie. Las técnicas de percepción remota son las únicas eficaces debido al gran dominio que debe abarcarse. Las dos más usadas para detectar y seguir las manchas de petróleo son el radar y la fotografía en diversas bandas de longitud de onda.

El coste de estas técnicas es elevado, pero la gravedad del problema justifica el uso de estas técnicas no convencionales. La detección remota se ha demostrado que es efectiva para el control de actividades relacionadas con vertidos, tanto para comprobar violaciones de las normas, como para su estudio y para facilitar las tareas de limpieza (se estima que puede llegar a ahorrar entre un 15 y 20 % de los costes de limpieza).

Además proporcionan otras ventajas como la posibilidad de adquirir datos de alta fiabilidad a intervalos regulares de tiempo o de forma continua. En particular, la radiación infrarroja o la luz visible sirve para obtener información de la calidad del agua (Gerani et al. 2001). Estudiando la alteración de la intensidad y color de la radiación luminosa al pasar por el agua, se puede deducir la naturaleza y concentración de los elementos que contiene. El sistema de análisis de temperatura también ha servido para buscar supervivientes de barcos naufragados.

3.5.1 Control por sensores ópticos

Las técnicas ópticas permiten la detección selectiva y la medida de la radiación en las distintas bandas del espectro electromagnético, desde la gama ultravioleta (entre 0.3 μm y 0.4 μm) hasta los infrarrojos (de 0.7 μm a 8 μm). Los sensores utilizados son los sistemas de fotografía, televisión, *scanning*, láser y microondas. Estos sensores pueden instalarse en plataformas especiales espaciales, aéreas, navales y en plataformas fijas. Existen numerosos satélites de la Agencia Espacial Europea con imágenes disponibles. Los datos obtenidos se almacenan como imágenes que mediante un análisis digital, pueden dar información de distintos fenómenos.

Los ultravioletas se basan en la distinta capacidad de reflexión de las radiaciones ultravioletas del espectro de luz por parte del agua y del hidrocarburo. Esta diferencia produce cambios de coloración de las ópticas o una diferencia de la tensión del detector electrónico. Este sistema es capaz de detectar películas de hidrocarburos de hasta 0.15 μm .

En cambio, el uso de radiaciones infrarrojas o microondas basa su efectividad en las radiaciones características de la temperatura de los cuerpos que se reflejan. Un sensor de infrarrojo térmico detecta diferencias de temperatura en un cuerpo de agua y en sus distintas zonas. Como el petróleo tiene una temperatura inferior al agua, se detecta una mancha oscura más intensa en las zonas más concentradas. La diferencia entre la temperatura radiométrica del agua cubierta por una película de hidrocarburo de unos 10 μm es de aproximadamente 1,4 °C. Este método puede utilizarse durante la noche, pues sólo depende de la temperatura. Los sistemas FLIR (*Forward Looking Infrared*) son sistemas pasivos que pueden ser visualizadas en tiempo real en una pantalla de televisión.

3.5.2 Control por radar

El radar registra las variaciones de amplitud en la agitación del mar causadas por la mancha de petróleo. El sistema SAR (*Synthetic Aperture Radar*) registra ondas que se reflejan mejor en el agua que en el hidrocarburo, produciendo una mancha oscura en una pantalla.

La técnica ha sido desarrollada por el laboratorio de Investigaciones Navales de los Estados Unidos. Este sistema es efectivo en condiciones meteorológicas adversas y abarca zonas extensas. El inconveniente que presenta es la identificación de la causa del cambio de la rugosidad de la superficie libre, que se puede tratar de hidrocarburo o bien puede ser debida al plancton, a zonas de surgencia de agua profunda o a viento local. Por ello su rango de aplicación se limita a viento de 3 a 10 m/s. El ciclo de 35 días del ESR-1 SAR asegura el cubrimiento de cualquier localización en Europa unas seis veces por mes, y ha demostrado ser una herramienta útil para la monitorización de vertidos, no solo porque no se ve afectado por la nubosidad, sino también por la rápida disponibilidad de los datos. Una red de estaciones terrestres a través de Europa puede recibir los datos de las imágenes listas para usar sólo unas pocas horas después de su adquisición.

Estos datos son importantes para valorar la extensión de la dispersión y dirigir las operaciones de limpieza y los aviones o aeroplanos que patrullan. El control indirecto por imágenes SAR se ha demostrado eficaz según los trabajos de Gade et al. (2006) y Redondo y Platonov (2009) y Tarquis et al. (2011). (documento adjunto como anexo 3).

3.6 TÉCNICAS DE ELIMINACIÓN

Las técnicas de limpieza de vertidos accidentales intentan eliminar la mancha de petróleo de forma artificial, o bien, simplemente evitar que se extienda o llegue a la costa confiando en la depuración natural por las bacterias y la agitación marina.

3.6.1 Limitación de la Mancha

Se trata de evitar que se disperse, procurando que quede concentrada en la menor superficie posible. Se produce mediante tres procedimientos básicos:

- Transporte del hidrocarburo en los tanques en forma de gel para evitar que se disperse en el mar si hay un accidente.
- Gelificar la periferia de una eventual mancha en caso de que se produjera.
- Adicionar ácidos grasos en la mancha, de forma que se aumente la viscosidad eliminando las fuerzas de dispersión y mitigando las de retracción.
- Confinamiento con una barrera física: superficiales, como las cortinas rígidas, semiflexibles y flexibles, y las profundas o neumáticas.

Las cortinas superficiales deben tener una parte emergida, para evitar que con el oleaje y el viento rebase el hidrocarburo y una parte sumergida, por lo que deben lastrarse. Para una buena retención la zona sumergida ha de ser unas cuatro veces la emergida.

Las barreras neumáticas consisten en un tubo agujereado colocado en el fondo, que insufla aire, creando una cortina de burbujas que ascienden. Estas barreras no suponen ningún obstáculo para la navegación, pero tienen el inconveniente de ser muy afectadas por el viento y las corrientes. Se suelen usar como método preventivo en las descargas.

3.6.2 Bombeo

Una vez confinado, hay que extraer el petróleo. En ocasiones las propias barreras físicas disponen de conductos de succión o son de materiales absorbentes. Hay medios mecánicos basados en la diferencia de densidad para aspirar el petróleo por bomba (skimmers, como el ejemplo de la figura 3.8). También hay barcos y pontonas que disponen de un sistema de recogida de petróleo y decantadores en el propio barco para separarlo del agua.

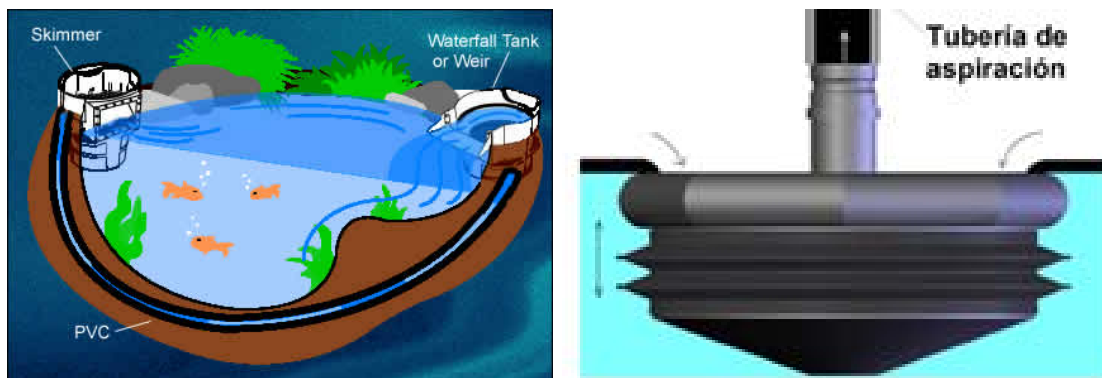


Figura 3-8. Esquema de contención y eliminación con skimmer.

3.6.3 Absorción

Consiste en extraer el petróleo mediante materiales a los que se absorbe fácilmente, como geotextiles de polivinilos, poliuretano y otros materiales hidrófobos o como sepiolita o arcillas expandidas que se echan a la mancha y cuando han empapado la máxima cantidad posible se recogen y destruyen. Tienen un rendimiento de entre 40 y 180 litros por minuto. Pueden ser de absorción discontinua como granulados, esponjas y trapos o continuos como rollos y barreras. En la figura 3.9 se pueden observar algunos ejemplos.



Figura 3-9. Muestras de absorbentes.

3.6.4 Biodegradación acelerada

La biodegradación del petróleo es un proceso natural que consiste en la transformación de los hidrocarburos en compuestos más solubles e inestables, que a su vez serán atacados por otros microorganismos transformándolos en compuestos más simples hasta conseguir su mineralización en CO_2 y H_2O .

El principal reto es acelerar la actividad microbiana para reducir los tiempos de degradación. Los organismos capaces de asimilar son escasos, no suelen ser especies dominantes en el medio y son muy vulnerables a éste. Las bajas temperaturas ralentizan el metabolismo, la salinidad reduce la permeabilidad de las membranas de las bacterias, la concentración de oxígeno ha de ser mínima para que se produzcan las reacciones, la presencia de componentes volátiles del petróleo inhiben a los microorganismos y la presencia de nutrientes como carbono, nitrógeno y fósforo limita el crecimiento bacteriano. La opción más segura es aprovechar la flora autóctona y estimular su actividad con la adición de nutrientes. Los nutrientes de aporte para favorecer el crecimiento deben ser compuestos de nitrato y fósforo que sean baratos, estables, no tóxicos y oleofílicos, es decir, sustancias que sean atraídas por los hidrocarburos para que se queden en la interfase agua-petróleo donde se van a desarrollar las bacterias.

El cultivo de bacterias consumidoras de hidrocarburos puede ser conveniente si la población de éstas es escasa. Los cultivos resultan efectivos en el lavado de tanques; sin embargo, al verterlos al mar se encuentran en un medio hostil y se puede producir un rechazo. Las bacterias más usadas son: *Arthrobarter*, *Micrococcus*, *Acinetobarter*, *Mycobacterium*, *Brevibacterium*, *Pseudomonas*, *Nocardia*, *Vidrio*, *Flavobacterium*, *Corynebacterium*, etc. También se usan levaduras como la *Candida* o la *Rhodotorula*, mohos como el *Sporobolomyces* o el *Cladosporium* y algas como la *Protheca hydrocarborea*.

En el puerto de Vilanova y la Geltrú, en abril de 2004, se hizo un experimento en una dársena confinada con una barrera con unos 140 m². Se vertió una mancha de 3,5 l de gas-oil, una contaminación equivalente a 250 l/ha, sobre la que se dispersó un cultivo a base de 400 g de Putidoil (nombre comercial de la bacteria *Pseudomona putida*-36) mezclados con aproximadamente 180 litros de agua de la dársena con nutrientes (N i P), y se dejaron en fermentación durante 6 h (Figueras y Anxo 2004).

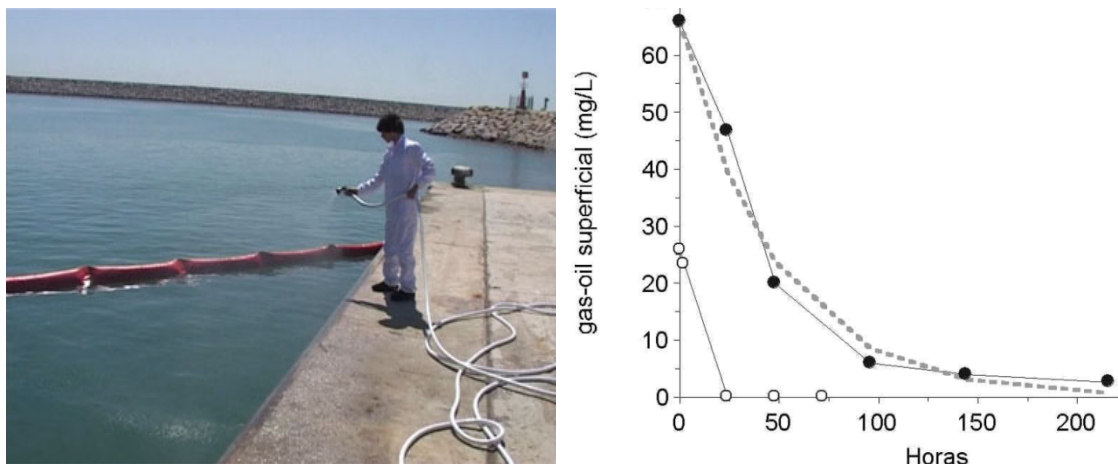


Figura 3-10. Prueba de biorremediación en Vilanova. Figueras y Anxo 2004

Se tomaron analíticas de calidad de aguas a unas horas, 24h, 48h y 72h en la zona tratada y otra sin tratar. Las muestras extraídas de la zona no tratada permiten observar el comportamiento de la degradación natural, rápida inicialmente, por la evaporación lenta de los elementos volátiles y ligeros tras las 24 h. En concreto, la prueba realizada muestra como con bacterias a las 24h no se detectan rastros de hidrocarburos, mientras que en el proceso natural no se alcanza este nivel ni a los 9 días. El tratamiento aplicado divide por un factor 4.5 el tiempo necesario para la desaparición del 90% del vertido.

Otros experimentos, como los de Perez Silva et al. (2003) con cepa *Pseudomonas aeruginosa* AT18 en la degradación de naftaleno, demostraron que tiene una actividad biodegradativa del 10 %. La adición de glucosa (2 %) incrementó la biodegradación en un 22 %. Produce 1,35 g/l de ramnolípidos en presencia de naftaleno y hasta 6,15 g/l en presencia de naftaleno más glucosa.

Normalmente al acabarse el hidrocarburo y no poderse alimentar las bacterias mueren, pero hay que tener cuidado con la introducción de nuevas especies en el hábitat y los posibles efectos secundarios que pueden ejercer sobre otras especies. Las bacterias se han demostrado útiles para limpiar pequeñas manchas, especialmente en materiales porosos o zonas confinadas. Sin embargo, para grandes manchas este método resulta difícil de aplicar.

3.6.5 Adsorción

Ultimamente los productos oleofílicos son los más utilizados, como el oilgoneasy <http://www.oilgoneeasy.com/es> El producto oleofílico (de fuerte afinidad al crudo en lugar del agua) se adhiere a los hidrocarburos y permanece allí a pesar de la lluvia, el viento o las mareas. Crea una micro-emulsión para facilitar el acceso de las bacterias endógenas a los contaminantes. La capa exterior actúa como catalizador para la degradación de hidrocarburos, así que los microorganismos empiezan a aumentar en número.

A diferencia de los fertilizantes regulares, el producto no sirve como alimento para organismos no degradadores de hidrocarburos; por lo tanto, sólo hay crecimiento de los

microorganismos si hay que descontaminar el sitio. Una vez que la capa exterior se divide por la bacteria endógena, el resultado es la rápida degradación de hidrocarburos, una microemulsión de hidrocarburos y la cantidad exacta de nitrógeno y fósforo que requiera el contaminante.

Este producto es recomendado por las autoridades para la limpieza en el Golfo de México en 2010: <http://www.epa.gov/emergencies/content/ncp/products/s200.htm>].

3.6.6 Precipitación

Esta técnica consiste en espolvorear la mancha de petróleo con partículas de un material de alta densidad como arena, caolín o cenizas, de forma que se adhieran al petróleo formando un grumo que precipite al fondo. Para una mayor efectividad, la superficie específica de las partículas debe de ser la mayor posible. Este sistema no soluciona el problema sino que lo cambia de sitio, de la superficie al fondo, por lo que sólo se debe recurrir a él en última instancia.

3.6.7 Combustión

Consiste en quemar la mancha, pero se ha visto que no es un método eficaz, pues las fracciones más combustibles son las volátiles, que por si solas desaparecen. Por otro lado, el agua actúa de refrigerante, dificultando la inflamación. Para facilitararlo se vierten sustancias absorbentes o productos inflamables que hagan de catalizadores del proceso. La combustión tiene efectos ecológicos muy desfavorables, por lo que su aplicación no es recomendable.

3.7 EFECTOS DE LAS TÉCNICAS DE LIMPIEZA

Según la publicación de Chapman et al. (2007) se ha comprobado que algunas de las técnicas de limpieza a base de dispersantes son ineficaces e incluso pueden resultar más perjudiciales que el propio vertido.

Desde el punto de vista ecológico, lo más deseable es el confinamiento y absorción de la mancha sin añadir ninguna sustancia ajena al medio. Desgraciadamente, el confinamiento de la mancha sólo es posible poco después del accidente, mientras sea relativamente pequeña, y los métodos de recogida sólo son eficientes en condiciones de mar en calma.

El empleo de sustancias absorbentes como paja dio muy buenos resultados en los accidentes de Santa Bárbara y San Francisco en manchas flotantes. Sin embargo, en la zona intermareal, los restos secos de paja y petróleo son más persistentes que el petróleo solo. El musgo de turba fue muy efectivo en la limpieza de las orillas afectadas en la Bahía de Chedabucto.

El uso de absorbentes sintéticos a base de microfibras de polipropileno oleofílicos está creciendo, pero nos enfrenta al problema de la persistencia de materiales no biodegradables, que una vez usados deben gestionarse como residuo especial.

La precipitación del petróleo con cal o arena es, en cuanto a impacto ecológico, poco deseable. Si bien puede proteger la zona intermareal, la deposición queda acumulada en el sedimento sobre una gran zona del fondo. En medios costeros o estuarios, donde hay una productiva comunidad bentónica, puede afectar seriamente a la pesca y las piscifactorías.

La combustión es biológicamente inocua, pero presenta dificultades en caso de manchas muy grandes y a menudo requiere aditivos oxidantes o mechas. Es una técnica para manchas pequeñas y aguas cálidas.

Los agentes dispersantes son soluciones que rompen los hidrocarburos en cadenas más cortas formando una emulsión con el agua. El daño biológico producido por una aplicación masiva de dispersantes fue devastador en el vertido del Torrey Canyon. En experimentos de laboratorio, se demostró que la combinación de detergentes y petróleo era más tóxica que cada componente por separado.

Posteriormente, se buscaron dispersantes menos tóxicos como el Corexit y el BP 1100, pero en combinación con petróleo dan productos tóxicos. La emulsificación del petróleo aumenta la cantidad de componentes tóxicos en solución que se dispersan a través del medio. Sin embargo, pueden darse casos en que puedan usarse para limpiar colonias de pájaros o mamíferos. Por ejemplo, en los planes de contingencia desarrollados por Gran Bretaña, se marcan unas épocas del año y zonas adyacentes a colonias importantes o dañadas en las que pueden emplearse. También está permitido, bajo estricto control y supervisión, en casos de riesgo de incendio u otros peligros importantes.

En Inglaterra y California se limpió la orilla con vapor. Éste, virtualmente exterminó la vida intermareal haciendo más daño que beneficio.

En playas de arena se puede rascar la capa manchada y tratar la en depósitos separadores. Aunque se producen daños a corto plazo, se pueden compensar por la eliminación de potencial contaminación persistente.

Los ecologistas parecen estar de acuerdo en que la evacuación física con absorbentes es la única técnica no destructiva para la limpieza de las orillas rocosas y que los dispersantes o el vapor no deben usarse. También los adsorbentes han dado buenos resultados y han sido los más empleados en los últimos vertidos.

3.8 TIPOS DE VERTIDOS

En función de los efectos los vertidos se pueden agrupar en tres clases:

- Aquellos relacionados con el largo tiempo de recuperación de un ecosistema contaminado.
- Aquellos debidos a contaminación continua, crónica o frecuente.
- Los de gran persistencia de la contaminación en el ecosistema.

3.8.1 Vertido puntual

Hay distintos grados o fases de recuperación del ecosistema contaminado. En Santa Barbara, la colonización de una costa rocosa comenzó prácticamente al mes, cuando

la biota intermareal se recuperó excepto en algunas áreas donde precipitaron depósitos asfálticos. Sin embargo, la fauna de la orilla rocosa tardó un año en recuperarse y mucho más en hábitats como la zona bentónica y las marismas, pues la sucesión biológica es lenta.

En comunidades naturales, una especie puede hacer excluir o limitar otras por competición o depredación. Si la especie dominante es eliminada o reducida bajo cierto umbral, las especies inferiores disponen de un resguardo seguro en una supervivencia atípica y pueden resistir otras presiones bióticas. Un ejemplo familiar de este fenómeno es el modelo de desarrollo de los bosques; los árboles de madera dura representan el clímax de la comunidad. Si un fuego arrasa el bosque, se repuebla con hierba y pinos. Ambos necesitan mucha luz y no pueden crecer bajo la capa de humus, de forma que gradualmente dejan lugar a árboles más duros.

En las comunidades marinas la sucesión es generalmente más rápida, aún así puede durar varios años. En las costas rocosas inglesas hay una comunidad de almejas, mejillones, lapas, algas y predadores de algas en equilibrio. Los predadores de algas controlan su crecimiento restringiendo la superficie de roca. Tras el vertido de crudo y limpieza de Cornualles todas las lapas murieron. En dos o tres meses empezaron a aparecer pegadas a unas algas verdes poco comunes. En el año siguiente, el vigoroso crecimiento de la capa vegetal característico reemplazó la fase verde. Pequeñas lapas empezaron a reaparecer pero no podían acabar con las grandes algas, de forma que el denso manto persistió durante tres o cuatro años.

Cuando los organismos de una zona han sido muy devastados pero el petróleo no persiste en el ecosistema, la recuperación biótica por sucesión de especies puede ser un proceso lento, sobretodo en comunidades altamente estructuradas. El tiempo necesario para la recuperación del clímax de una comunidad contaminada varía desde unas semanas o meses hasta una década. La duración dependerá tanto de la complejidad estructural de la comunidad como del grado de daños iniciales.

3.8.2 Contaminación crónica

El gran crecimiento de la cantidad de petróleo en alta mar ha llegado al grado de contaminación crónica. Las zonas cercanas a refinerías, plantas petroquímicas, estaciones portuarias y otros tipos de descargas están expuestas a contaminación crónica, continua o frecuente, por las operaciones habituales y suponen una contaminación de 10 a 100 ppm diaria.

Redondo y Platonov (2009) estudiaron los vertidos detectados por la vigilancia por Imágenes SAR de ERS-1 / 2 del proyecto Clean Seas y analizó la persistencia de una mancha según su tamaño y obtuvo una buena correlación que cumple la Ley de Zipp como se puede ver en la figura 3.11. El porcentaje de los derrames detectados de pequeño tamaño, hasta 100 km², es de aproximadamente 38%. En la franja media no se dispone de datos ya que estaba fuera del rango del proyecto, pero según esta extrapolación la previsión de vertidos de 500 km² es de 80, lo que correspondería a un gran accidente de 40.000km². Por ello, los pequeños y medios vertidos deben tenerse en cuenta, ya que producen una contaminación equivalente a los grandes accidentes.

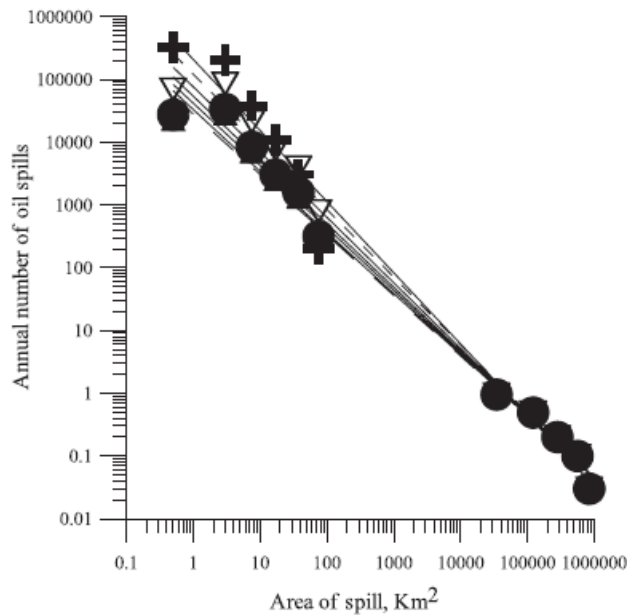


Figura 3-11. Relación de número de vertidos y su tamaño. Redondo y Platonov 2009

La persistencia y dispersión de los depósitos contaminados del fondo de West Falmouth, Santa Bárbara y Chedabucto Bay indica que el petróleo de un único derrame puede retrasar la recuperación debido a la toxicidad continua o a la saturación y re-contaminación de una comunidad recuperada. La persistencia o frecuencia de la contaminación interrumpe repetidamente la sucesión de comunidades, por lo que puede mantener una comunidad inmadura y con escasa diversidad.

Los efluentes de las refinerías pueden producir un considerable impacto en masas de agua confinada donde la dispersión del vertido es lenta. La elevada concentración favorece la oxidación biológica del hidrocarburo, produciendo un déficit de oxígeno en el fondo y las condiciones anóxicas son letales para gran cantidad de especies. Por ejemplo, el hábitat sedimentario del puerto de Los Angeles fue devastado por este proceso. En cambio, en aguas abiertas, el efecto se extiende sobre un radio de cientos de metros pero con baja concentración y, por tanto, menores efectos. Los animales nadadores pueden migrar a zonas mejores.

Estudios del hábitat en el canal de Houston (Texas) indican un gran descenso de la diversidad de especies. Sin embargo, no se puede establecer que sea la única causa, ya que puede deberse a otras fuentes de contaminación o al cambio de las condiciones de salinidad, pH o temperatura. Los efectos del petróleo en el plancton, las larvas y las comunidades neustónicas no están bien definidos, pero parece que incluso a muy bajas concentraciones puede afectar a la fotosíntesis. Muchos ecosistemas de la costa se caracterizan por un descenso de la diversidad de especies y grandes fluctuaciones diarias de la concentración de oxígeno disuelto, alcanzando condiciones cuasi-anaerobias cerca del fondo. Bajo algunas condiciones, los materiales de alta toxicidad inhiben la respiración y la fotosíntesis; en cambio, bajo otras condiciones, la descomposición de los residuos y el vertido de nutrientes estimulan el metabolismo.

3.8.3 Contaminantes persistentes

Hay indicios de una amplia contaminación marina por hidrocarburos en casi todos los océanos en mayor o menor grado. La dispersión rebaja los niveles a muy bajas concentraciones, pero la persistencia de estos compuestos en el medio y en los organismos debe considerarse en un análisis a largo plazo. Se puede detectar por sus efectos en el medio, peces de alta mar, sargazos, materia en suspensión y en la capa superficial.

El petróleo, incluso a muy bajas concentraciones, tiene un hedor que afecta a los sentidos de los organismos marinos, alterando su comportamiento. Concentraciones de crudo disuelto del orden de 20 a 40 ppm provocan modificaciones en la conducta alimenticia de las gambas. Concentraciones todavía menores, de 1 a 4 ppm afectan los sentidos de localización del alimento a los gusanos de mar.

La contaminación persistente o relicta puede tener serias consecuencias. Efectos de bajo nivel o impacto pueden ser graves, por ejemplo disfunciones de la respiración, fotosíntesis u otras funciones metabólicas; perturbaciones del comportamiento normal asociado a la alimentación, aprendizaje, desarrollo o reproducción; posibles efectos cancerosos o mutagénicos; etc.

Se ha suscitado una gran alarma por los efectos cancerígenos que puede provocar la ingestión de pescado contaminado. Los compuestos del petróleo y de los productos refinados contienen conocidos componentes cancerosos, principalmente aromáticos policíclicos, en pequeñas proporciones. Aunque estas cantidades sean pequeñas, deben evitarse debido al riesgo que suponen.

4 DISPERSIÓN COSTERA Y TURBULENCIA

A continuación se hace una revisión teórica sobre los fenómenos de la difusión y la dispersión, para analizar las distintas formulaciones y agentes que intervienen en la deformación y desplazamiento de una mancha.

4.1 CONCEPTOS BÁSICOS

4.1.1 Flujo viscoso

Se entiende por material viscoso aquel que se deforma irreversiblemente bajo la acción de esfuerzos. Así, las tensiones de corte por unidad de superficie son proporcionales al gradiente de velocidades perpendicular (v) a esta superficie, cuya constante de proporcionalidad es la **viscosidad cinemática** (μ) dinámica ($\eta = \mu\rho$)

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{\partial v}{\partial Z} \quad \text{Ec. 4-1}$$

4.1.2 Conservación de masa

Si los cambios de flujo de una cantidad escalar en dirección x se consideran desde un punto de vista conservativo, la variación volumétrica del escalar es la divergencia del flujo en esa dirección. Entonces la ecuación de Fick queda de la siguiente forma:

$$\frac{dc}{dt} = -\frac{d}{dx} Fc = -\frac{d}{dx} \left(-D \frac{d}{dx}\right) = D \frac{d^2c}{dx^2} \quad \text{Ec. 4-2}$$

Si el flujo es incompresible entonces:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \text{Ec. 4-3}$$

4.1.3 Ecuaciones de Navier-Stokes

La conservación de la cantidad de movimiento, la segunda ley de Newton, establece que la suma de fuerzas (de masa, tensiones de corte y presión) que actúan en una partícula es igual a su masa por su aceleración.

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla) u \right) = -\nabla p + \rho g + \mu \nabla^2 u \quad \text{Ec. 4-4}$$

Para flujo incompresible, desarrollando en derivadas parciales las ecuaciones anteriores, se llega a las ecuaciones de Navier-Stokes que definen la hidrodinámica básica.

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right)$$

Ec. 4-5

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial(p + \rho g z)}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$

4.1.4 Vorticidad

Debido a la viscosidad, si la diferencia de velocidades entre capas es grande, al deslizar unas sobre otras, las fuerzas viscosas obligan a girar sobre sí mismas a las superficies de contacto, produciendo así remolinos. Debido a ello existe una mayor pérdida de carga por viscosidad, pues se absorbe energía para formar el remolino. Para su análisis, se expresan las ecuaciones de la dinámica de fluidos mediante el rotacional de la velocidad, conocido como vorticidad.

$$\vec{\omega} = \nabla \times \vec{u} = \text{rot } \vec{u} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ u_x & u_y & u_z \end{vmatrix}$$

Ec. 4-6

Aplicando el operador rotacional a las ecuaciones de Navier-Stokes se eliminan los términos de presión, ya que el rotacional de un gradiente es nulo.

En la superficie del océano, donde se puede considerar la turbulencia a media y gran escala como bidimensional, la ecuación de la vorticidad, se puede definir a partir de la función de corriente y es el laplaciano de la función de corriente.

4.1.5 Flujo turbulento

La relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas de viscosidad en un flujo es lo que determinara su carácter laminar o turbulento. Existen varias definiciones clásicas sobre la turbulencia (Hinze 1975; Batchelor 1967 y 1982; Lesieur 1997). En general, se dice que un flujo es laminar cuando sus líneas de corriente son paralelas y es turbulento cuando sus rasgos fundamentales son:

- Es impredecible, desordenado, con variaciones aleatorias de sus parámetros (velocidad, presión, densidad, etc.) en el tiempo y en el espacio, aunque el flujo medio sea estacionario.
- Produce mezcla y transferencia de energía rápidamente, es muy disipativo y difusivo, produce mezcla con mucha más efectividad que en un flujo laminar.
- Tiene una alta rotacionalidad y una transferencia de energía entre los remolinos de escalas espaciales diferentes.
- Interviene un gran rango de escalas espaciales.

4.1.6 Número de Reynolds

En un flujo turbulento la tensión de corte causada por la turbulencia es mucho mayor del que la que produce la viscosidad molecular, ya que las capas adyacentes tienden a tener velocidades similares, es decir que el flujo turbulento introduce una fuerza de arrastre mucho mayor de lo que ocurriría en el caso laminar. Así Reynolds (1883) estableció un parámetro adimensional, conocido como Número de Reynolds (Re), que representa la razón entre la fuerza de inercia y la fuerza viscosa y permite clasificar el flujo en laminar y turbulento.

$$\text{Re} = \frac{V.L}{\nu} \quad \text{Ec. 4-7}$$

donde:

- V es una velocidad característica del fluido.
- L es una dimensión representativa, diámetro, longitud de onda.
- ν la viscosidad cinemática.

Un régimen laminar se caracteriza por valores bajos del número de Reynolds, es decir que dominan las fuerzas viscosas. Un régimen turbulento se caracteriza por valores altos del número de Reynolds, es decir que las fuerzas de inercia son dominantes

4.1.7 Ecuaciones de Reynolds

Reynolds hizo una descomposición estadística de las variables hidrodinámicas $u(x_i, t)$ en una media \bar{u} más una fluctuación u' , de manera que la media de fluctuaciones es nula en un intervalo de tiempo característico T .

$$u(x_i, t) = \bar{u}(x_i, t) + u'(x_i, t) \quad \text{Ec. 4-8}$$

Esto supone que las fluctuaciones u' , v' , w' , al estar multiplicadas y promediadas se convierten en correlaciones (covarianzas) $\overline{u'v'}$, $\overline{v'w'}$, $\overline{u'w'}$. Así, las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas tienen la misma forma que las originales, excepto por la aparición de nuevos términos de fuente, llamadas tensiones de Reynolds, que acoplan el campo medio con el campo fluctuante.

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \bar{u} - \rho \left(\frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \bar{v} - \rho \left(\frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'^2}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \bar{w} - \rho \left(\frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'^2}}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad \text{Ec. 4-9}$$

que se pueden expresar en forma tensorial como:

$$R = \rho \begin{bmatrix} \overline{u'u'} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{v'u'} & \overline{v'v'} & \overline{v'w'} \\ \overline{w'u'} & \overline{w'v'} & \overline{w'w'} \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 4-10}$$

Las correlaciones representan el transporte de momentum en una dirección (i) hacia otra dirección (j) o viceversa, ya que son simétricos.

El tensor de Reynolds introduce seis nuevas incógnitas, por lo que el problema no está cerrado. Para su resolución hay tres grandes frentes de investigación: analítico, numérico y experimental o fenomenológico, en los que se hará hincapié más adelante.

4.1.8 Difusión molecular. Ley de Fick

Es un proceso irreversible por el que las partículas de un contaminante en un medio gaseoso o líquido en reposo, se desplazan mezclándose hasta su homogeneización. Su parámetro representativo es la concentración C , la cantidad de masa por unidad de volumen.

Según la ley de Fick el **flujo** de partículas F_c , cantidad de masa que atraviesa una superficie por unidad de tiempo, tiene dirección opuesta al gradiente de la concentración de las mismas y es proporcional a él. El coeficiente de proporcionalidad es el **coeficiente de difusión D**

$$F_c = -D \frac{dc}{dx} \quad \text{Ec. 4-11}$$

El origen físico de este proceso se debe a las colisiones entre átomos y moléculas. Si el tamaño de las moléculas suspendidas y las moléculas del medio es el mismo se habla de Difusión Molecular, como una gota de tinta en agua en reposo sin aportes de calor ni otros agentes.

4.1.9 Difusión turbulenta

Para medios en movimiento se produce una difusión turbulenta por el transporte de una cantidad dada debido a los movimientos asociados a las fluctuaciones en el fluido. Cuando se considera la difusión turbulenta de un escalar, normalmente se asume que existe una analogía entre procesos moleculares y turbulentos. Debido a esta analogía, algunos autores observan que los remolinos que son característicos del flujo turbulento poseen fluctuaciones similares al movimiento molecular. La difusión turbulenta es mayor que la molecular, aunque para escalas grandes se puede aplicar la teoría molecular.

Para el coeficiente de **difusión turbulenta K** la conservación de la masa admite el mismo argumento, sólo que considerando las fluctuaciones del flujo en el tiempo y en

el espacio, se interpreta como una relación lineal entre flujos turbulentos $\overline{u'c'}$ (x, y, z, t) y gradientes espaciales. (Masch, 1963). Así la ecuación de difusión turbulenta es:

$$\frac{dc}{dt} = \frac{d}{dx} \left(K(x, y, z, t) \frac{dc}{dx} \right) \quad K = \frac{\overline{u'c'}}{dc/dx} \quad \text{Ec. 4-12}$$

Generalmente, la difusión turbulenta es mucho mayor que la difusión molecular pero, en la naturaleza, cuando ocurre difusión turbulenta a la vez actúa también la difusión molecular y es muy común que existan procesos de intercambio entre flujos turbulentos y no turbulentos. La suma de los dos tipos de difusiones puede entonces calcularse:

$$\frac{dc}{dt} = D \frac{d^2c}{dx^2} + \frac{d}{dx} \left(K \frac{dc}{dx} \right) \quad \text{Ec. 4-13}$$

El coeficiente K también podría depender de la dirección, representándose entonces por un tensor K_{ij} , con $1 \leq i, j \leq n$ y n es el número de dimensiones espaciales.

$$K_{ij} = \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{pmatrix} \quad \text{Ec. 4-14}$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + (\vec{V}(x, y, z, t) \cdot \vec{\nabla})c = D \vec{\nabla}^2 c + \vec{\nabla} \cdot (K(x, y, z, t) \cdot \vec{\nabla} c) \quad \text{Ec. 4-15}$$

4.1.10 Mecanismos de dispersión

Inman et al. (1971), estudiaron el comportamiento de una sustancia conservativa introducida en un fluido, este puede ser dispersado de dos formas:

- Si el centro de masa del trazador se mueve con la corriente presente, este tipo de dispersión es atribuido a la advección o a la circulación (domina el término $\vec{V} \cdot \vec{\nabla} c$).
- Si el trazador se expande radialmente con cambios en la concentración, el efecto es atribuido a la difusión (domina el término $K \nabla^2 c$).

En otras palabras, la advección transporta y la difusión produce mezcla que se refleja con el aumento del área del trazador con el tiempo. Estos procesos también ocurren asociados, como por ejemplo puede darse la dispersión de un trazador de grandes dimensiones por varios remolinos pequeños siendo el agente provocador la difusión aunque existan procesos advectivos en la escala de los remolinos.

También es común que estos procesos se den en secuencia, y a varias escalas, actuando primeramente un proceso y después otro, dando continuidad a la dispersión. Por ejemplo, cuando la concentración del trazador se torna uniforme en una determinada área y la mezcla por la difusión en esta zona ya no es importante, la advección y otros fenómenos a gran escala dominan la futura dispersión del trazador.

Así, la importancia de los mecanismos de advección y difusión depende de las escalas temporales y espaciales de los procesos de dispersión.

4.1.11 Dispersión horizontal

Para las **escalas espaciales** las distribuciones de las componentes de la velocidad se pueden clasificar en dos tipos de procesos: 2D (dos dimensiones) y 3D (tres dimensiones), relacionados respectivamente con difusión a gran escala y a pequeña escala. El fenómeno de la turbulencia es tridimensional pero el análisis bidimensional es una forma de simplificarlo, ya que en los océanos las magnitudes horizontales son algunos órdenes de magnitud mayores que en la dirección vertical.

En este estudio se considera la dispersión horizontal (se tomará el plano (x,y)) de esta forma:

$$K_{ij} = \begin{pmatrix} K_x & 0 \\ 0 & K_y \end{pmatrix} \quad \text{Ec. 4-16}$$

Además, se considera un sistema de referencia móvil solidario a la mancha que se difunde. Por tanto la advección es nula y se tiene:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) \quad \text{o} \quad \frac{\partial \bar{c}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) \quad \text{Ec. 4-17}$$

Si K es constante en una dirección se tiene:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = K_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad \text{y} \quad \frac{\partial c}{\partial t} = K_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \quad \text{Ec. 4-18}$$

Entonces:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \vec{K} \cdot \nabla^2 c \quad \text{Ec. 4-19}$$

La solución de la ecuación de difusión en la dirección x en un proceso browniano es;

$$c(x,t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi Kt}} e^{-\frac{x^2}{4Kt}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{\rho}{2}\sigma}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad \text{Ec. 4-20}$$

$$\sigma^2 = 2Kt \quad K = \frac{\sigma^2}{2t} \quad \text{Ec. 4-21}$$

Según Einstein (1905), también se puede expresar el coeficiente de difusión como:

$$K = \frac{1}{2} \frac{d\sigma^2}{dt} \quad \text{Ec. 4-22}$$

$$\frac{x^2}{2\sigma^2 t} \quad \frac{x^2}{2\sigma^2 t} \Rightarrow 2\sigma^2 = 4K \quad \frac{d(\sigma^2)}{dt} = 2K \Rightarrow \sigma^2 = 2Kt \quad \text{Ec. 4-23}$$

4.1.12 Agentes actuantes

El comportamiento del oleaje en relación con la difusión cambia mucho según el tipo de oleaje. Las olas formadas por vientos locales son olas de pequeñas crestas y muchas de ellas rompen introduciendo un movimiento turbulento significativo y son de carácter irrotacional. Las olas del tipo mar de fondo ("swell"), que tienen su origen en tormentas distantes, son mucho más regulares y su movimiento es prácticamente irrotacional.

Debido a esto, este tipo de ola no es tan efectivo en procesos de mezcla, aunque favorece el transporte de masa. Este transporte ocurre en la dirección de propagación del oleaje y es muy importante en la advección debido a la generación de corrientes inducidas por el oleaje. En la zona de rotura, la mezcla inicial y la dilución dependen primariamente de la mezcla turbulenta que resulta del movimiento de traslación propio del oleaje y que está próximo a la superficie combinado con el movimiento turbulento de rotura del oleaje.

La interacción olas-corrientes es otro agente causante de la difusión. Los estudios experimentales comprueban la importancia en la dispersión de la combinación entre ondas y corrientes. Estudios realizados por Zeidler et al. (1976) confirman que esta relación de interacción entre ondas y corrientes es bastante significativa al comparar situaciones opuestas. Se encuentra que las ondas originan un comportamiento de fuerte dispersión, como un factor de aceleración después que las olas rotan un cierto ángulo crítico con respecto la dirección de advección resultante, y presentan un equilibrio si este ángulo no es realmente alto.

Un factor muy importante en los procesos de difusión en el océano es el rango de escalas de trabajo, pues estas determinan las fuerzas básicas que serán dominantes. Las fuerzas que actúan en el océano fueron clasificadas por Apel (1995), en cinco clases:

- Fuerzas Gravitacionales y Rotacionales
- Fuerzas Termodinámicas
- Fuerzas Mecánicas
- Fuerzas Internas: de presión y viscosidad.
- Fuerzas de Contorno

En el océano existen dos mecanismos importantes que determinan las escalas: la rotación y la estratificación. La rotación no parece que sea relevante en el rango delimitado por $1 < \ell < 20$ m y de segundos $< T <$ horas, ya que el parámetro de Coriolis es $f \cong 10^{-4}$ seg y la estratificación sólo será importante cuando la densidad de los trazadores sea muy distinta, como en el caso del petróleo.

Aquí actúan fuerzas mecánicas del tipo de las citadas más arriba, como la tensión del viento sobre la superficie del mar, la cizalla entre dos flujos etc. También son importantes las condiciones de contorno traducidas por la morfología costera (configuración de línea de costa y batimetría).

El transporte mecánico puede ser dividido en dos partes: a) transporte por medio de velocidad de corriente (advección); b) transporte causado por la presencia de fluctuaciones aleatorias y caóticas en la velocidad de campo (difusión). Ozmidov (1990) dice que la predicción de transporte mecánico de sustancias en el océano es difícil y requiere conocimiento de la regularidad de los factores que influyen en el proceso.

Un factor importante es la dirección de propagación de la difusión, que en general ocurre en ambas direcciones, vertical y horizontal. La mayoría de los trabajos se han enfocado más a la difusión horizontal que a la difusión vertical en tres dimensiones. Esto se debe a la dificultad del análisis de los problemas de mezcla vertical que involucran movimientos complejos (estratificación, ondas internas etc) y la influencia de la gravedad. Aunque muchos autores se han dedicado en mayor medida a los procesos de mezcla horizontal, no considerando el estudio de la mezcla vertical por ser esta menor en relación a la mezcla horizontal, es importante conocer también la extensión de la mezcla vertical para estimar correctamente las concentraciones del trazador, o para estudios del plancton y de los procesos de transporte atmósfera-océano (ver Marrasé et al. 1997 y Gabaldon 2000), donde la mezcla y la difusión turbulenta vertical son fundamentales.

Masch (1963), observó que la mezcla y dispersión de material vertido (trazador) en el océano depende en general de 2 aspectos:

La mezcla inicial del trazador en las proximidades inmediatas del punto de descarga se puede considerar un problema de la difusión del chorro. La mezcla inicial está afectada por la disposición espacial entre la sustancia vertida y la masa de agua marina influenciada por los componentes oceanográficos, tales como corriente de marea, corriente debida al oleaje, corriente asociada con gradientes de densidades, corrientes inducidas por el viento y turbulencia debida al oleaje.

La acción del viento en la difusión sobre la superficie del mar es básicamente la transferencia de parte de la energía del viento hacia el agua, donde parte de esta energía es disipada por la turbulencia o acción viscosa y parte es utilizada para generar corriente. Cuando masas de viento soplan sobre la superficie del mar, éstas originan corriente sobre las capas superficiales del agua y, si el viento es suficientemente fuerte, además se forman ondas de superficie. Sin embargo, el desarrollo de esta corriente puede presentarse de forma retardada respecto a la aparición del viento, llegando a varias horas.

La tasa de energía que es transmitida por el viento hacia el agua puede ser descrita como producto de la tensión de cizalla entre la superficie del agua y la velocidad del viento. Un gran número de investigadores ha estudiado la naturaleza de la cizalladura en la superficie del agua y se han propuesto modelos basados en la rugosidad de la superficie del agua y en la velocidad del viento. La ecuación aquí empleada para calcular la tasa de transferencia del viento en la capa superficial también sigue esta línea: es la ecuación de tensión de Reynolds ($\tau_{Reynolds} = \rho \cdot u_*^2$).

4.2 ESCALAS ESPACIALES Y TEMPORALES

De una forma generalizada, la turbulencia o la difusión turbulenta puede ser dividida en escalas grandes y pequeñas. En el caso de turbulencia a gran escala, se considera el proceso como bidimensional y la energía del flujo puede tener direcciones opuestas. Por el contrario, la turbulencia a pequeña escala es siempre tridimensional, siendo la energía transferida hacia la pequeña escala (escala de Kolmogorov).

La escala de este trabajo corresponde a escalas más pequeñas, aunque también es interesante comprender los procesos turbulentos a mayor escala, porque son quienes aportan más energía y contribuyen considerablemente en la dinámica general de los océanos. Los procesos turbulentos a gran escala son dependientes de la rotación de la Tierra debido a la aceleración de Coriolis.

El origen de la gran escala turbulenta en el océano es el resultado de movimientos circulatorios que son directamente inducidos en el agua por la turbulencia producida por el viento, inestabilidades barotrópicas y baroclínicas de flujos a gran escala, vórtices originados sobre irregularidades topográficas del fondo marino o inclinaciones de superficies isopícnicas.

Candela (1997) concluyó que, según la zona marina en la que se trabaja, las escalas cambian considerablemente. La figura 4.1 complementa esta idea y muestra la variación de las características de las escalas temporales y espaciales.

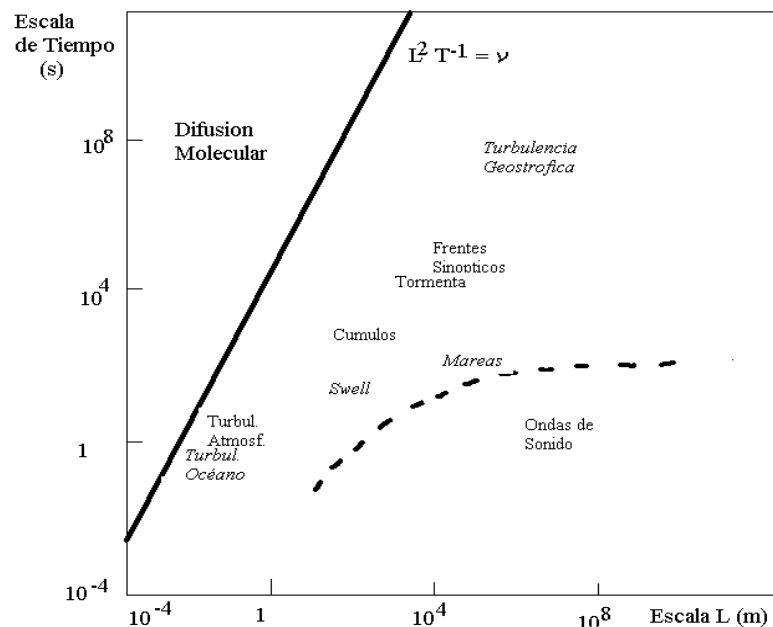


Figura 4-1. Escalas temporales y espaciales en el medio ambiente. Candela (1997)

Las pequeñas escalas turbulentas son según Monin (1970 a y b), generadas en el océano por los mecanismos siguientes (Figura 4.2):

- Inestabilidad del gradiente de velocidad vertical en la dirección del fluido (“drifting flow”).

- Rotura de ondas de superficie (“overtuning”).
- Inestabilidad del gradiente de velocidad vertical a gran escala en flujos oceanográficos estratificados.
- Inestabilidad hidrodinámica a media escala casi horizontal en flujos no estacionarios.
- Inestabilidad del gradiente de velocidad local en ondas internas.
- Convección en capas con densidad de estratificación inestable.
- Inestabilidad del gradiente de velocidad vertical en capas límites del fondo marino.

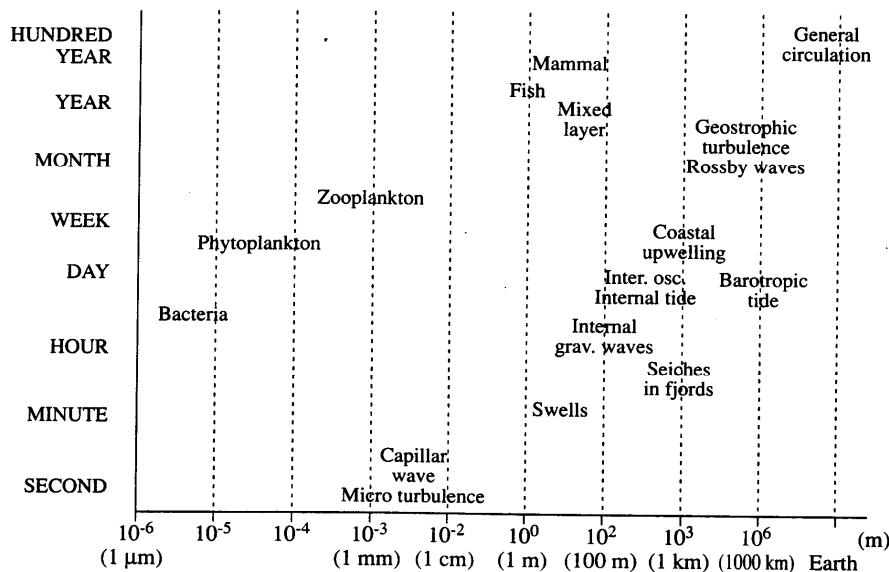


Figura 4-2. Escalas temporales y espaciales de procesos naturales bio-físicos. Monin (1970)

4.3 TEORÍAS SOBRE LA TURBULENCIA

4.3.1 Teoría de Kolmogorov y el Espectro Turbulento

La turbulencia es un fenómeno observado en flujos en geofísica, tanto en líquidos como en gases. Las variables termodinámicas e hidrodinámicas de estos flujos experimentan fluctuaciones caóticas, que son inducidas por vórtices de diferentes dimensiones (Ozmidov, 1990) que se superponen Richardson (1922). Las escalas de estos vórtices son, a su vez, gobernadas por diversos parámetros. Por ejemplo, en el océano o la atmósfera, los gradientes de temperatura (T) y/o de salinidad (S), la estratificación de la densidad, o las condiciones de contorno (capa límite atmosférica, topografía del fondo marino, proximidad con la costa etc.). Como estas variables cambian aleatoriamente en el tiempo y en el espacio, las escalas de longitud consecuentemente sufren fluctuaciones que responden a las escalas a las cuales hay un aporte de energía y a las que se disipa.

Los grandes vórtices están asociados con altos números de Reynolds y son siempre inestables, desintegrándose a su vez en vórtices pequeños que son más estables

(Figura 4.3). En el caso de vórtices bidimensionales, existe una cascada inversa de energía que estabiliza los vórtices grandes. Este fenómeno de transferencia de energía de los remolinos grandes a los remolinos pequeños hasta las escalas donde actúa la disipación viscosa es conocido como efecto de **cascada de Richardson** (Monin y Ozmidov, 1985).

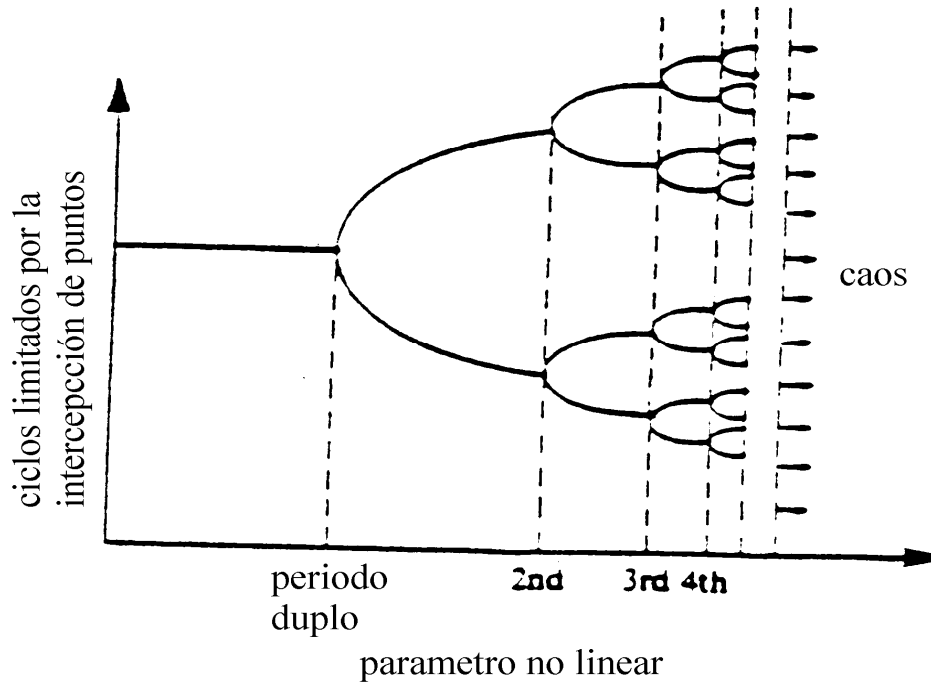


Figura 4-3. Transición de un movimiento estable hacia la Turbulencia (caos), de acuerdo con la Teoría básica de Kolmogorov. (1941)

El **espectro turbulento** representa la magnitud de la contribución de cada número de onda ($k = 2\pi/L$) o frecuencia de los remolinos superpuestos a la energía cinética ($E(k)$) turbulenta total (Stull, 1991).

El espectro se puede dividir en 4 zonas, como muestra la figura 4.4:

- Zona de remolinos grandes.
- Zona de remolinos de mayor energía.
- Zona de subrango inercial.
- Zona de dominio viscoso.

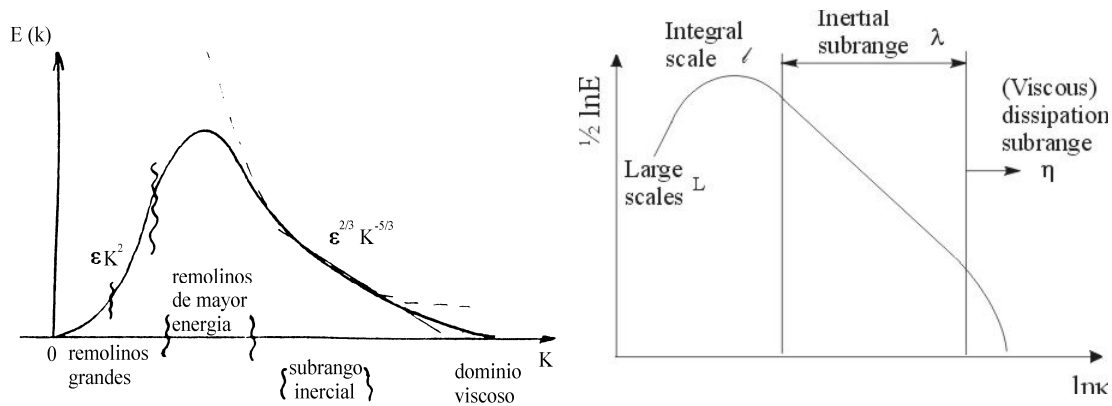


Figura 4-4. Zonas características del espectro turbulento.

Estas zonas delimitan el comportamiento de las escalas de la turbulencia y la distribución de energía.

Cuando el número de Reynolds es alto, el espectro de remolinos turbulentos se extiende sobre un amplio rango. Existe una fuerte interacción entre estos remolinos debido al carácter no-lineal y tridimensional de la turbulencia. La energía turbulenta suele generarse por medio de las inestabilidades del flujo medio, mientras que las escalas pequeñas son responsables de la disipación viscosa. La **disipación viscosa** (ν) convierte la energía cinética del movimiento en calor.

Entre la zona de los remolinos de mayor energía y la de disipación viscosa, existe una región llamada **subrango inercial** en el que la energía solo depende de la disipación por unidad de masa (ϵ) y el número de onda (k), formulando dos hipótesis principales:

- Existe un **rango de equilibrio** en que las propiedades medias de las componentes de la pequeña escala de Kolmogorov (η_k) de cualquier movimiento turbulento para grandes valores de Re son determinadas únicamente por la viscosidad ν y la disipación de energía másica ϵ . Las escalas de longitud y velocidad son

$$\nu_n = (\nu\epsilon)^{1/4} \quad \eta_k = (\nu^3/\epsilon)^{1/4} \quad \text{Ec. 4-1}$$

- Para números de Re altos, existe un “**subrango inercial**”, dentro del rango de equilibrio, que está cerca a su vez de la región viscosa, donde las estructuras de los remolinos son independientes de la entrada de energía o de la disipación viscosa y donde solamente la transferencia local de energía es importante. En este subrango las propiedades medias de los números de onda son independientes de ν y quedan determinados únicamente por ϵ . En este subrango inercial el número de onda k satisface $1/L \ll k \ll 1/\eta_k$ (Garratt, 1992), donde L es la escala integral. Se divide esta zona en p intervalos de número de onda (k), donde; $k = 2\pi/L$ siendo L la escala característica del remolino. Dimensionando el aporte y disipación de energía por unidad de masa ϵ respecto la velocidad V y periodo T

$$\varepsilon \approx \frac{V^2}{T} \approx \frac{V^3}{L} \tag{Ec. 4-2}$$

La Ley espectral de Kolmogorov (1941) considera que la disipación (ε) es constante en el “subrango inercial”, de manera que la velocidad relativa asociada V_n depende de la escala k_n del remolino y por lo tanto, de la integral de la densidad del espectro de energía $E(k)$,

$$V^2 = \int_0^\infty E(k)dk', \quad E(k) \approx \varepsilon^{2/3} \cdot k^{-5/3}, \quad V_n^2 \approx \varepsilon^{2/3} \cdot k_n^{-2/3} \tag{Ec. 4-3}$$

Las propiedades estadísticas de la turbulencia están determinadas únicamente por el ritmo de la energía disipada en el fluido y la escala en la llamada zona de “subrango inercial”.

En la turbulencia a gran escala intervienen los parámetros de cizalla ($S_{ij} = \partial \bar{u}_i / \partial x_j$), disipación de energía ε , y frecuencia k , esto es $\mathbf{E} = \mathbf{E}(\mathbf{S}, \varepsilon, k)$. En cuanto a la turbulencia a pequeña escala, la energía del espectro depende de la viscosidad ν , la disipación de energía ε y la frecuencia k , siendo $\mathbf{E} = \mathbf{E}(k)$.

Chassaing (2000) comparó diferentes experimentos y mostró como aumenta el rango espectral con el número de Reynolds como se ve en la figura 4.5.

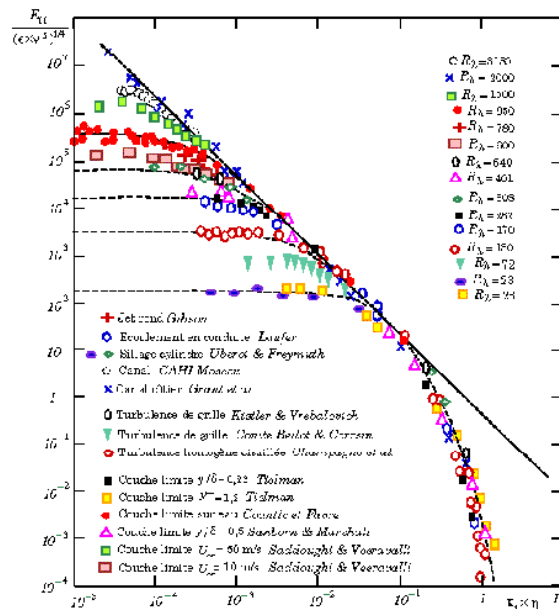


Figura 4-5. Experimentos con distintas energías de Chassaing (2000)

En síntesis, el flujo de energía permite hacer una clasificación de las longitudes de las escalas turbulentas.

Escala externa L, como escala determinada por las condiciones de contorno es la escala del flujo medio turbulento.

Escala Integral: ℓ es la integral de la autocorrelación espacial $R(x)$ entre fluctuaciones de velocidad u' y la varianza σ^2 de la fluctuación u' .

$$\ell = \int_0^{\infty} R(x) dx \quad R(x) = \frac{\overline{u'(a)u'(a+x)}}{\sigma^2} \quad \text{Ec. 4-4}$$

Microescala de Taylor λ , es aquella escala a la que la producción local de energía cinética turbulenta se iguala a la disipación local (Taylor, 1931); está asociada a la curvatura de las correlaciones espaciales de velocidad $R(x)$.

$$\varepsilon = 2\nu \frac{u'^2}{\lambda^2} \quad \text{Ec. 4-5}$$

Microescala de Kolmogorov: η_k es aquella pequeña escala en la que existe isotropía local, esto es, que los remolinos pequeños son independientes de la dirección en el espacio o de la forma del flujo. En esta región del espectro las variaciones con el tiempo son muy rápidas.

4.3.2 Teoría de Boussinesq

Boussinesq, para simplificar la ecuación de Reynolds, usa una analogía entre los tensores viscoso y turbulento introduciendo **el coeficiente de difusión de momentum turbulento** K_m , con las mismas dimensiones del coeficiente de viscosidad cinemática molecular ν . En el caso de un flujo paralelo uniforme en un plano en la dirección x ($\bar{u} = \bar{u}(z), \bar{v} = 0, \bar{w} = 0$), K_m se define mediante la relación entre el flujo de momentum y el gradiente vertical de velocidad media, de forma:

$$\overline{\rho u'w'} = -\rho K_m \left(d\bar{u}/dz \right) = -A \left(d\bar{u}/dz \right) \quad \text{Ec. 4-6}$$

y análogamente a la viscosidad dinámica μ , multiplicando por la densidad ρ , se define **A**:

$$K_m = \frac{A}{\rho} \quad A \leftrightarrow \mu \quad K_m \leftrightarrow \nu \quad \text{Ec. 4-7}$$

Entonces la tensión de cizalladura $|\tau|$ ("shearing stress") global, incluyendo tanto las tensiones viscosas como las turbulentas será:

$$|\tau| = -(\mu + A) \left(d\bar{u}/dz \right) \quad \text{Ec. 4-8}$$

De estas relaciones se puede ver que el término de viscosidad (o difusividad de momentum) turbulenta actuará conceptualmente de forma similar a los términos viscosos, aunque ya no serán constantes, sino que dependerán del tipo de flujo.

Las viscosidades moleculares y turbulentas se pueden sumar, pero como normalmente los valores turbulentos son de varios órdenes de magnitud superiores $K_m \gg \nu$, entonces se desprecian los componentes moleculares de las tensiones, de forma que

$$|\tau| = -A \cdot (d\bar{u}/dz) = -\rho K_m (d\bar{u}/dz) \quad \text{Ec. 4-9}$$

La teoría de Boussinesq no considera K_m constante, en cuanto ésta puede variar tanto en el espacio como en el tiempo o con el tipo de flujo. En algunos casos, como en la atmósfera o el océano, donde la variabilidad principal depende de la altura (o profundidad), se utilizan modelos sencillos de variación de las viscosidades turbulentas manteniendo la hipótesis de Boussinesq de proporcionalidad entre los flujos y los gradientes. Esta es una de las teorías que más se usan para modelos geofísicos de transporte turbulento.

4.3.3 Teoría de Prandtl para la Longitud de Mezcla

La teoría de longitud de mezcla (ℓ) fue introducida por Prandtl por analogía con el recorrido libre medio molecular, tal como es definido en la teoría cinética de los gases. Según esta teoría, la transferencia de momentum lineal se produce por choques entre moléculas que se mueven de forma aleatoria.

Limitando la teoría al transporte vertical de momentum

$$\bar{u} = \bar{u}(z), \bar{v} = 0, \bar{w} = 0 \quad \text{Ec. 4-10}$$

Las correlaciones $\overline{u'w'}$ son proporcionales a la diferencias en la velocidad media a distintas alturas, con un coeficiente de proporcionalidad ℓ_m la **longitud de mezcla**.

$$d\bar{u} = \ell_m (d\bar{u}/dz) \quad \text{Ec. 4-11}$$

Dimensionalmente, si se multiplica este vector por si mismo, se obtiene un escalar, la **difusividad turbulenta de momentum (Km)** o **viscosidad turbulenta**, que según la definición se interpreta como el producto de una velocidad y una longitud característica del flujo:

$$Km = cte. = d\bar{u} \cdot \ell \quad \text{Ec. 4-12}$$

Usando la diferencia de velocidad media como característica de las fluctuaciones $du = u'$ y suponiendo que la escala integral es proporcional a la longitud de mezcla, se tiene que:

$$Km = -\ell_m^2 \left(\frac{d\bar{u}}{dz} \right) \quad \text{Ec. 4-13}$$

$$\overline{u'w'} = -\ell_m^2 \left(d\bar{u}/dz \right)^2 \quad \text{Ec. 4-14}$$

La interpretación de ℓ_m o “**longitud de mezcla**” como transporte de una propiedad, puede extenderse a cualquier escalar o vector en el flujo, siempre que se considere que los gradientes de dicha propiedad son constantes a esa escala.

Se puede determinar un coeficiente de dispersión turbulento variable en el espacio recogiendo la variación espacial de la propia longitud de mezcla como:

$$K_m(x, y, z) = -\ell_m(x, y, z)^2 \left| \frac{d\bar{u}}{dz} \right| \quad \text{Ec. 4-15}$$

Y en el caso de la viscosidad turbulenta dinámica A ,

$$A = \rho K_m = -\rho \ell_m^2 \left| \frac{d\bar{u}}{dz} \right| \quad \text{Ec. 4-16}$$

Prandtl se basa en parámetros de fácil interpretación física, como la longitud media para la que los remolinos ceden todo su momentum al flujo.

4.3.4 Teoría del Transporte de Vorticidad de Taylor,

En lugar de considerar los cambios de momentum lineal de una capa a otra como Prandtl, Taylor consideró los cambios de momentum angular o vorticidad.

Para algunos casos particulares, estas dos formas dan el mismo resultado, como en la distribución de la velocidad en un chorro de dos dimensiones. En cambio, cuando la longitud de mezcla depende de la posición de forma más compleja, se obtienen resultados diferentes, Taylor (1931).

Para algunos casos especiales, donde la turbulencia está formada por remolinos con una escala de tiempo mayor que el tiempo en que el remolino pasa a través del sensor de velocidad (Powell & Elderkin, 1974), la turbulencia puede ser considerada como “congelada”, esto es, las fluctuaciones temporales pueden ser consideradas como espaciales ($d\xi/dt = 0$, simplificación de Taylor).

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = -u \frac{\partial \xi}{\partial x} - v \frac{\partial \xi}{\partial y} - w \frac{\partial \xi}{\partial z} \quad \text{Ec. 4-17}$$

Así, la velocidad puede ser usada para convertir medidas turbulentas en función del tiempo a la correspondiente medida en función del espacio. Es preciso resaltar que la turbulencia no permanece constante frente a la convección.

Esta hipótesis puede también ser expresada en términos de numero de onda, $k = 2\pi/\lambda$ y frecuencia $\omega = 2\pi/T$, para longitud de onda λ y período de onda T característicos de los remolinos de forma sencilla como:

$$k = \frac{\omega}{u} \quad \text{Ec. 4-18}$$

Si se utilizan las escalas integrales de longitud Λ y tiempo θ

$$\Lambda = \frac{\theta}{u} \quad \text{Ec. 4-19}$$

Para satisfacer los requisitos de los cambios de los remolinos o vórtices mientras estos pasan por un sensor, se considera necesario que la desviación standard de la velocidad σ_u cumpla que:

$$\sigma_u < 0.5\bar{u} \quad \text{Ec. 4-20}$$

La hipótesis de Taylor puede usarse cuando la intensidad turbulenta I sea pequeña ($<1/4$) y entonces los remolinos de tamaño pasarán sin grandes cambios por el sensor de velocidad.

$$I = \frac{\sigma_u}{\bar{u}} \quad \lambda = \frac{I\bar{u}}{\frac{\partial \bar{u}}{\partial z}} \quad \text{c. 4-21}$$

4.3.5 Hipótesis de Similitud de Von Kármán

Según esta hipótesis, se intenta encontrar un valor de la longitud de mezcla (ℓ_m) independiente del tipo del flujo, de acuerdo con dos suposiciones de similitud:

- El mecanismo turbulento es independiente de la viscosidad (excepto en la zona próxima a una capa límite).
- Las fluctuaciones son estadísticamente las mismas para cualquier punto cambiando solamente las escalas de tiempo y longitud.

De estas suposiciones Von Karman determinó la constante de Von Karman κ según la altura z :

$$[\tau] = \rho \ell_m^2 \left| \frac{d\bar{u}}{dz} \right| \frac{d\bar{u}}{dz} \quad \ell_m \propto \kappa z \quad \text{Ec. 4-22}$$

donde supuso que la ley de mezcla está relacionada con la altura (z).

En el caso de cizalladura Prandtl la estimó como:

$$\ell_m = \kappa \frac{d\bar{u}/dz}{d^2\bar{u}/dz^2} \quad \text{Ec. 4-23}$$

$$[\tau] = \frac{\rho \kappa^2 (d\bar{u}/dz)^4}{(d^2\bar{u}/dz^2)^2} \quad \text{Ec. 4-24}$$

La constante de Von Karman es una constante universal, medida experimentalmente, con valores entre 0.38 a 0.4 (Stull, 1991).

4.4 CLASIFICACIÓN DE LA TURBULENCIA

4.4.1 Clasificación por escalas

Según Redondo et al. (1990) y Redondo (1995 y 1996) cuando la escala de la mancha que se difunde (D) es mayor que la escala característica de los remolinos (l), la mancha presenta sus bordes recortados. En el caso contrario, cuando la escala (l) es mayor que la escala (D), la geometría de la mancha tiene contornos más suaves por estar “protegida” dentro de la escala del remolino (figura 4.6). Para el caso en que la escala (l) sea proximadamente igual a la escala (D), la geometría de la mancha asume formas más sinuosas (Bezerra, 2000)

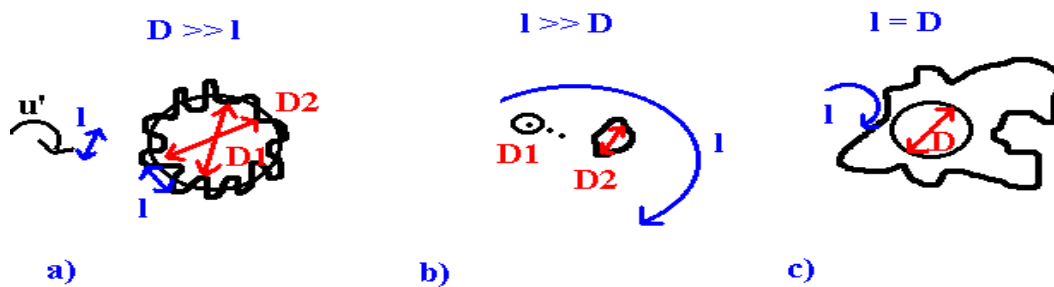


Figura 4-6. Difusión según la escala que la genere. Redondo 1990

Hipótesis de Taylor. Cuando la velocidad típica u' de la turbulencia cumple $u' \ll \bar{u}$, se convierte la dependencia espacial en una dependencia temporal, ya que $\ell = u' \tau$ donde ℓ y τ son las escalas integrales de espacio y tiempo.

$$\ell = \int_0^\infty R(x) dx \quad \tau = \int_0^\infty R(t) dt \quad \text{Ec. 4-25}$$

Aquí $R(x)$ es la función de correlación entre las velocidades. Al aplicarse la Hipótesis de Taylor se tiene que $\ell = \bar{u} \tau$.

El proceso de difusión turbulento de concentración se modela mediante la ecuación de Fick, aquí reescrita de forma vectorial

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} c = \vec{\nabla} \cdot K(x, y, z, t) \vec{\nabla} c \quad \text{Ec. 4-26}$$

Este proceso de difusión, como fue explicado anteriormente, está muy relacionado con las escalas, tanto espaciales como temporales (Figura 4.7), de lo que se deducirá el efecto de la escala (ℓ), en la dispersión a partir de la relación con la varianza σ :

$$K(t, \ell) = \sigma \frac{d\sigma}{dt} \quad \text{Ec. 4-27}$$

4.4.2 Difusión molecular

Integrando la ecuación para una difusividad $K(t, \ell)$

- K constante:

$$\int_{t_0}^t K dt = \int_{\sigma_0}^{\sigma} \sigma d\sigma \tag{Ec. 4-28}$$

$$\frac{1}{2}(\sigma^2 - \sigma_0^2) = K(t - t_0) \Rightarrow \sigma \cong (2K)^{1/2}(t - t_0)^{1/2} \tag{Ec. 4-29}$$

Este caso de dispersión es análogo a la dispersión molecular

$$\sigma \propto t^{1/2} \tag{Ec. 4-30}$$

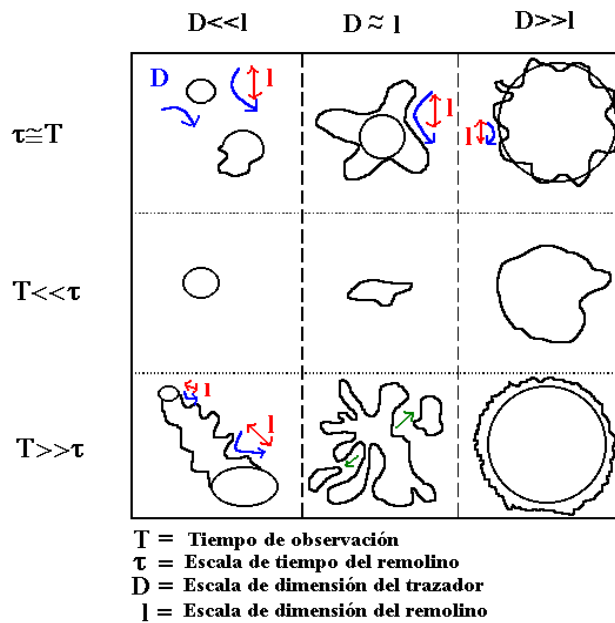


Figura 4-7. Difusión según la escala temporal y espacial. Redondo 1990

4.4.3 Subrango inercial

En el caso de difusión turbulenta dentro de un subrango inercial, el rango del espectro (η) entre la escala integral (ℓ) (producida por algún fenómeno relevante tal como la rotura de oleaje o la cizalladura del viento o las corrientes) y la escala de Kolmogorov:

$$\eta = \left(\frac{v^3}{\varepsilon} \right)^{1/4} \tag{Ec. 4-31}$$

Según la Teoría de Kolmogorov (1941), se tiene que las fluctuaciones de velocidad dependen de la escala, de forma que $u' = c\varepsilon^{1/3}\ell^{1/3}$.

Si se aplica este tipo de dependencia al cálculo del coeficiente de difusión cuando la escala integral es del mismo tamaño que la mancha difundida (caso c, figura 4.7) $\ell \approx \sigma$, y son las fluctuaciones de velocidad las que producen la difusión. Tomando;

$$K = \sigma \frac{d\sigma}{dt} = \ell u \quad \text{Ec. 4-32}$$

y sustituyendo la dependencia entre u y ℓ , se tiene en función de la turbulencia media, ε , que fue dada empíricamente por Richardson (1922), y se denomina Ley de Richardson.

$$K = c \varepsilon^{1/3} \ell^{4/3} \quad \text{Ec. 4-33}$$

Usando esta dependencia en la difusividad turbulenta $K(\ell)$ en un proceso de dispersión de un trazador, si se cumple que $\ell \approx \sigma$ se tiene una relación exponencial entre el tamaño de la mancha de trazador y el tiempo con exponente 3/2.

$$K(\ell) = c \varepsilon^{1/3} \ell^{4/3} = \ell \frac{d\ell}{dt} \quad \text{Ec. 4-34}$$

$$\int_{t_0}^t c \varepsilon^{1/3} dt = \int_{\sigma_0}^{\sigma} \ell^{1-4/3} d\ell \quad \text{Ec. 4-35}$$

$$\int_{\sigma_0}^{\sigma} \ell^{1-4/3} d\ell = \int_{\sigma_0}^{\sigma} \ell^{-1/3} d\ell \quad \text{Ec. 4-36}$$

$$\sigma \cong \left(\frac{3c}{2} \right)^{3/2} \varepsilon^{1/2} (t - t_0)^{3/2} \quad \text{Ec. 4-37}$$

Por lo tanto

$$\sigma \propto t^{3/2} \quad \text{Ec. 4-38}$$

4.4.4 Difusividad lineal

En el caso en que la **difusividad dependa linealmente de la escala**, tal como sucede con la difusión producida por la fricción de una superficie o cuando la turbulencia esta limitada por la costa, si se define una velocidad de fricción de forma similar al perfil logarítmico del viento, se tiene una dependencia lineal del tiempo.

$$u^* = \sqrt{\tau/\rho} \quad K = u_* \ell \quad \text{Ec. 4-39}$$

$$u_* \ell = \ell \frac{d\ell}{dt} \quad \text{Ec. 4-40}$$

$$\int_{t_0}^t u_* dt = \int_{\sigma_0}^{\sigma} d\ell \quad \text{Ec. 4-41}$$

$$\sigma - \sigma_0 = u_* (t - t_0) \quad \text{Ec. 4-42}$$

Por lo tanto

$$\sigma \propto t. \quad \text{Ec. 4-43}$$

4.4.5 Difusión anómala

En diversos procesos turbulentos donde hay aportes de energía a distintas escalas espaciales se describe la **difusión anómala** de forma general cuando

$$\sigma \propto t^{n/2}. \quad \text{Ec. 4-44}$$

En base a los exponentes, se pueden clasificar la difusión como balística ($\sigma^2 \propto t^{<1}$), gaussiana ($\sigma^2 \propto t^1$), inicial ($\sigma^2 \propto t^2$), Richardsona ($\sigma^2 \propto t^3$) con valores del exponente n entre n = 1 (caso de K = cte.) y n = 3 (caso de turbulencia homogénea $K = c\ell^{4/3}$, Ley de Richardson), como se ve en la figura 4.8.

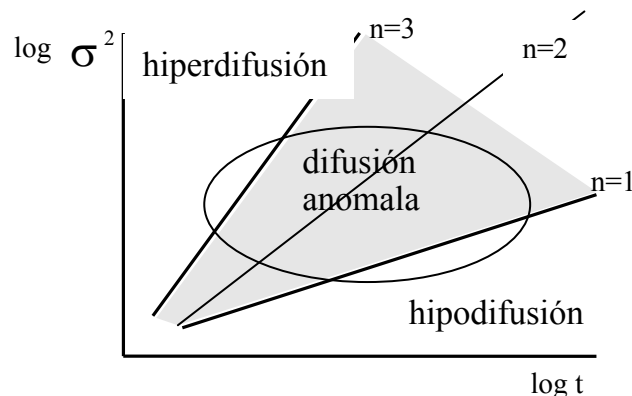


Figura 4-8 Difusión Anómala.

Los valores por encima de $n=3$ se pueden considerar hiperdifusivos, Los valores inferiores a $n=1$ hipodifusivos o de muy baja difusión. El caso de $n=2$ es la conocida como difusión balística. La difusión anómala engloba los distintos tipos, no Gaussianos y no característicos de la Ley de Richardson.

Castilla (2001) comparó con distintos modelos la dependencia entre el exponente n asociado a la difusión y la pendiente del espectro, corrigiendo el rango de aplicación de la Ley de Richardson generalizada.

En el anexo 1 se amplía la teoría de la turbulencia profundizando en los términos no lineales dando una descripción integral a distintas escalas, que nos llevan a los conceptos como helicidad y enstrofia. También se analiza en el concepto de intermitencia, ya que la turbulencia medioambiental no es homogénea ni isotrópica. Así se analizan algunas discontinuidades típicas de flujos estratificados. Por otro lado se presenta la técnica de estudio de la turbulencia como el análisis fractal y multifractal y su aplicación al análisis de cascadas turbulentas. Se analiza el factor de escala y su afición a los diferentes parámetros para ver la compatibilidad de las distintas escalas.

5 ANÁLISIS DIGITAL DE IMÁGENES

Una vez registradas las imágenes, se han de digitalizar para obtener una matriz numérica cuyo contenido, analizado adecuadamente, permite obtener resultados cuantitativos. Para conseguirlo es necesario realizar un proceso de manipulaciones, transformaciones y análisis específico en función de las condiciones de la grabación y del tipo de parámetro que se desee obtener.

Este apartado pretende ser un resumen donde reflejar la metodología empleada. Para mayor información se redactó un manual detallado de aplicación del sistema que puede ser útil para posteriores investigaciones. (Diez 1998)

5.1 CAPTACIÓN DE LAS IMÁGENES

Para filmar la superficie marina a escala de 10-100 m con una buena resolución horizontal es necesario elevar la cámara al menos unos 10 m. Para ello, y en función del escenario, se emplearon diferentes medios de elevación: un globo de helio de 5 m de diámetro con la cámara suspendida en una plataforma y anclado con tres cabos de nylon, el extremo de un mástil de un velero, la pluma de una grúa de construcción, edificios altos de primera línea de mar, etc. Los dos primeros tienen el inconveniente de ser oscilantes según el viento; sin embargo tienen la ventaja de la proximidad y resolución de las imágenes de la zona de estudio.

Para analizar las imágenes, poder compararlas entre si y poder obtener verdaderas magnitudes, es necesario que haya puntos de referencia llamados puntos fiduciales. En la figura 5.1 se marcan puntos para la restitución. En zonas de playa, puertos o donde aparezcan puntos fijos es conveniente colocar marcas de referencia. Estos puntos deben aparecer distribuidos por toda la imagen para minorar errores, por lo que también es necesario que haya marcas en la zona de agua. En zonas de poca profundidad se pueden colocar boyas ancladas a muertos. En aguas más profundas se pueden tomar desde barco marcas de GPS sincronizadas con la toma de imágenes, por ejemplo el vertido de trazadores.



Figura 5-1. Marcando puntos de referencia

Para registrar un experimento conviene previamente determinar el campo visual de la imagen y ajustar la posición y orientación de la cámara, de modo que el dominio de los experimentos esté incluido en éste y que se vea con una resolución adecuada (por ejemplo que los puntos fiduciales se puedan distinguir, es decir, que ocupen al menos un píxel).

Además, hay que cuidar detalles como: tener una iluminación adecuada para que haya un buen contraste o eliminar sombras y reflejos.

TRAZADORES

Para obtener parámetros hidrodinámicos mediante el análisis de imágenes es necesario que haya evidencias visuales suyas. Si no se visualizan de forma natural se puede conseguir artificialmente, vertiendo un trazador.

Para el estudio de dispersión de contaminantes es necesario seleccionar una sustancia: que sea persistente, tenga un buen contraste, que no se altere con la presión, temperatura o salinidad, que no sea nociva para la flora o la fauna y, si es posible, que no sea muy cara. Por ejemplo en los experimentos de Delta 93 se compararon: Rodamina B, Fluoresceína sódica, Permanganato potásico, Cal y leche. Se demostró que la leche con fluoresceína daba un contraste y permanencia excelente. En la figura 5.2 se ven dos fotos de manchas de leche con y sin fluoresceína para ver la diferencia.



Figura 5-2. Comparación de dos manchas de leche, con y sin fluoresceína.

En el caso de seguimiento por partículas conviene que sean de un tamaño suficientemente grande para que ocupen al menos un píxel y de un color que de un buen contraste. Para atenuar el efecto del viento conviene darles cierto peso a los aros, boyas u otros trazadores lagrangianos, de modo que respondan más a la corriente que al viento.

Es deseable que si se toman medidas de otros parámetros adicionales se haga de forma sincronizada, pues aporta información adicional que permite estudiar la influencia de dichos parámetros en el proceso.

Una vez obtenidas las imágenes, se seleccionan los test de mayor interés en función del tipo de parámetro que se desee estudiar (dispersión, oleaje, etc.). Después se procede a elegir las imágenes especificadas y las ventanas correspondientes, como las que contengan la mancha de trazador.

Una imagen se digitaliza y se analiza como una matriz cuyos elementos son los píxeles y su valor es la intensidad de luz. Los datos de intensidad se analizan estadísticamente y así es posible el estudio de los parámetros con trazas visuales como la trayectoria, velocidad, concentración, forma y tamaño de la dispersión de una mancha.

5.2 CÁLCULO DIRECTO DEL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN TURBULENTA

En el artículo de Rodríguez et al. (1997 a), se describe la metodología de cálculo:

El cálculo del coeficiente de difusión turbulenta K según la analogía de Einstein 1905 con el movimiento Browniano, puede hacerse directamente a partir de la variación con el tiempo de la desviación estándar del tamaño de una mancha de trazadores o de un conjunto de boyas, $\sigma(t)$ de forma que;

$$K = \frac{1}{2} \frac{d \cdot \sigma^2(t)}{dt} = \sigma(t) \frac{d\sigma(t)}{dt} \quad \text{Ec. 5-1}$$

Con medidas en dos tiempos sucesivos t y $t + T$, indicado en la figura, se tiene;

$$K = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma(t+T)^2 - \sigma(t)^2}{T} \quad \text{Ec. 5-2}$$

$$K = \frac{1}{2T} (\sigma^2(t+T) - \sigma^2(t)) \quad \text{Ec. 5-3}$$

$$\sigma(t+T) = \sigma(t) + T \frac{d\sigma(t)}{dt} \quad \text{Ec. 5-4}$$

$$\begin{aligned} K &= \frac{1}{2T} \left(\left(\sigma(t) + T \frac{d\sigma(t)}{dt} \right)^2 - \sigma(t)^2 \right) = \frac{1}{2T} \left(\sigma^2(t) + 2\sigma(t)T \frac{d\sigma(t)}{dt} + T^2 \left(\frac{d\sigma(t)}{dt} \right)^2 - \sigma(t)^2 \right) \\ &= \sigma(t) \frac{d\sigma(t)}{dt} + \frac{T}{2} \left(\frac{d\sigma(t)}{dt} \right)^2 \end{aligned} \quad \text{Ec. 5-5}$$

de forma que despreciando el termino de 2 orden, se tiene;

$$K(t) = \sigma(t) \frac{d\sigma(t)}{dt}, \quad \text{Ec. 5-6}$$

que permite calcular la difusividad como el producto de la desviación estándar o tamaño típico de la mancha por la velocidad típica de agrandamiento. Llamando a los valores medios de la mancha en el tiempo t_0 como las medidas de difusión inicial se tiene:

$$\bar{\sigma}(t_0) = D \quad \text{y} \quad \frac{d\bar{\sigma}(t_0)}{dt} = V \quad K = DV \quad \text{Ec. 5-7}$$

Esta ecuación fue la utilizada en este trabajo para calcular los valores de difusión, siendo K el coeficiente de difusión dado en ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), D la distancia asociada al diámetro de la mancha en (m) y V la velocidad de crecimiento de la dimensión de la mancha en (m/s).

SISTEMÁTICA

Mediante el sistema del vídeo, la digitalización y las correcciones necesarias por las distorsiones producidas es posible seguir la evolución real de la mancha a lo largo del tiempo y cuantificar su dispersión. Para ello, se sigue el proceso numérico-estadístico siguiente:

i) Obtención de las ventanas de imágenes instantáneas: Se establece una relación, de tipo lineal en este caso, entre la intensidad de cada pixel de la imagen con la concentración del trazador en ese punto. Para observar el decaimiento de la concentración a medida que la mancha se dispersa, se toma una serie de imágenes instantáneas cada pequeño intervalo de tiempo. De cada imagen se extrae la ventana que contiene la mancha. Las variables que hacen referencia a ellas llevan un subíndice “*m*”.

ii) Corrección de la distorsión por el movimiento de la superficie libre: como la variación de la superficie del mar por efecto de las olas distorsiona la geometría de las manchas dificultando la medición de sus variaciones geométricas se debe corregir este efecto, tanto para la dimensión transversal como para la longitudinal. Para la dimensión transversal, K_{trans} , en los casos con rotura y corriente longitudinal intensa (≈ 1 m/s en los test 8 y 9) se generó, mediante el promediado temporal (en 30”), una “pluma ficticia”. La variación transversal de dicha pluma permitió conocer la evolución temporal de la varianza respectiva, y por lo tanto, la determinación de K_{trans} . Para la obtención de K_{long} se obtuvo la evolución de la magnitud longitudinal promediando las manchas en un periodo de ola y filtrando, posteriormente, el decaimiento de intensidades mediante un filtro no lineal.

iii) corrección del “background”: Las intensidades de cada mancha también están distorsionadas por la intensidad del fondo de la imagen, luminosidad o rugosidad variable. Ésta es distinta en cada lugar y en cada instante, pues la luz incide con distinto ángulo en cada punto y en cada momento por el movimiento que produce el oleaje. Debido a ello, se debe tomar para cada ventana otra de igual tamaño pero sin mancha, el “background”. Si se trata de una pluma, el “background” debe estar promediado durante el mismo tiempo que la imagen a tratar, pero cuando no haya mancha. Las variables que hacen referencia al mismo llevan el subíndice “*b*”.

Una vez obtenidos mediante *DigImage* los ficheros correspondientes a la digitalización y tratamiento de las imágenes, se pasa al tratamiento de éstos mediante *TICE*.

iv) Filtrado de la mancha: Para separar la mancha del fondo se hace un filtrado automático, que elimina los puntos de intensidad inferior a una intensidad de corte. Esta intensidad de corte es determinada en particular para cada imagen, pues la intensidad del campo digitalizado varía con el tiempo y en el espacio. Para elegir esta intensidad de corte, se posiciona el cursor en puntos que no haya mancha y se estima cual es la intensidad que mejor delimita el contorno de la mancha. Si la ola rompe sobre la mancha, la espuma producida oculta temporalmente la mancha o parte de ella; esta interferencia debe filtrarse manualmente, pixel a pixel, en cada imagen. Para ello es conveniente conocer bien la imagen real, ya que al digitalizar se modifica el color dificultando la identificación de la espuma, y escoger los instantes y las ventanas adecuadamente para poder eliminar en parte este efecto. Con las correcciones mencionadas, se pasa al tratamiento numérico de las matrices de intensidades para cuantificar la dispersión del trazador.

v) Cálculo de las varianzas ponderadas: Primero se determina el centro de la mancha (ξ_x, ξ_y) de cada ventana instantánea filtrada como momento de primer orden o centro de gravedad del campo de intensidades:

$$\xi_x = \frac{1}{MN} \sum_i \sum_j X_{i,j} \frac{I_{i,j}}{\left(\sum_i \sum_j I_{i,j} / N\right)} \quad \text{Ec. 5-8}$$

Donde $X_{i,j}$ es la coordenada horizontal real correspondiente al pixel de coordenadas (i,j) y, análogamente, $Y_{i,j}$ es la coordenada transversal. $I_{i,j}$ es la intensidad de ese pixel y N es el número de píxels de la matriz de la mancha filtrada.

Las varianzas, V_x , V_y y V_{xy} , se determinan como momento de segundo orden del campo de intensidades:

$$V_x = \frac{1}{N} \sum_i \sum_j (X_{i,j} - \xi_x)^2 \frac{I_{i,j}}{\sum_i \sum_j I_{i,j} / N} \quad \text{Ec. 5-9}$$

$$V_{xy} = \frac{1}{N} \sum_i \sum_j (X_{i,j} - \xi_x)(Y_{i,j} - \xi_y) \frac{I_{i,j}}{\sum_i \sum_j I_{i,j} / N} \quad \text{Ec. 5-10}$$

En los casos con rotura del oleaje que se han analizado, había una corriente longitudinal que arrastraba la mancha de derecha a izquierda de la imagen. Debido a ello, se determinó el eje de la pluma como lugar geométrico de los puntos de máxima intensidad de cada columna. Esta intensidad $I_p(i)$ permite determinar el decaimiento, pero hace falta la variación temporal correspondiente. Para ello, se necesita relacionar el eje de la pluma con la velocidad y tiempo transcurrido. Las variables que hacen referencia a la pluma llevan un subíndice "p"

El tiempo t_p correspondiente a la posición j en el eje de la pluma es:

$$t_p(j) = t_m(i) + F_{IT} * (t_m(i+1) - t_m(i)) \quad \text{Ec. 5-11}$$

siendo $t_m(i)$ el tiempo al que se tomó la imagen instantánea i -ésima y F_{IT} el factor de interpolación

$$F_{IT} = \frac{X_m(i) - X_p(j)}{X_m(i) - X_m(i+1)} \quad \text{Ec. 5-12}$$

Las intensidades interpoladas del suavizado de las imágenes instantáneas I_{suavp} y del "background" I_{bp} se calculan como:

$$I_{suavp}(j) = I_{suavm}(i) + F_{IT} * (I_{suavm}(i+1) - I_{suavm}(i)) \quad \text{Ec. 5-13}$$

$$I_{bp}(j) = I_{bm}(i) + F_{IT} * (I_{bm}(i+1) - I_{bm}(i)) \quad \text{Ec. 5-14}$$

siendo I_{suavm} la intensidad suavizada de la imagen instantánea y I_{bm} la intensidad del "background" del fondo.

El valor de la intensidad de la pluma corregido $I_{plumacor}$ debe multiplicarse por dos factores de suavizado: el de los picos de intensidad y el del “background”:

$$I(i, j)_{plumacor} = I(i, j)_{pluma} * \frac{I_{suavp}(j)}{I_p(j)} \frac{I_{bmed}}{I_{bp}(j)} \quad \text{Ec. 5-15}$$

siendo I_{bmed} la intensidad media del fondo

$$I_{bmed} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{bm}(i) \quad \text{Ec. 5-16}$$

Se calcula el coeficiente de dispersión transversal como ya se indicó previamente:

$$K_{trans} = \frac{1}{2} \frac{d\sigma_t^2}{dt} \quad \text{Ec. 5-17}$$

donde σ es la desviación estándar. Para calcular la derivada temporal se hace una aproximación como diferencias finitas de primer orden.

$$K_{trans} \approx \frac{1}{2} \frac{\Delta\sigma_t^2}{\Delta t} = \frac{1}{2} \frac{(\sigma_{i+1}^2 - \sigma_i^2)}{(t_{i+1} - t_i)} \quad \text{Ec. 5-18}$$

Los incrementos de tiempo se obtienen a partir de la coordenada X de la posición de la pluma dividida por la componente horizontal de la velocidad por advección de la mancha $VELX$:

$$\Delta t_i = \Delta X_i / VELX \quad \text{Ec. 5-19}$$

$$VELX_m(j) = \frac{(X_m(i+1) - X_m(j))}{(t_m(i+1) - t_m(i))} \quad \text{Ec. 5-20}$$

La evolución de las varianzas longitudinales, se obtiene de forma análoga, como ya se mencionó. En este caso, la determinación es más sencilla al promediar las manchas en un periodo de ola ($T \approx 5-6s$). Luego, como se muestra en la fig. 5, se suavizan los picos y se multiplican las intensidades respectivas por los factores de corrección.

5.3 SOFTWARE DE TRATAMIENTO AVANZADO DE IMAGENES

En el tratamiento digital de imágenes conviene distinguir entre los componentes físicos y los programas de cálculo o visualización. Existe una gran variedad de programas o “software” destinados al tratamiento de imágenes.

El programa utilizado permite digitalizar tanto series de imágenes instantáneas, como promediadas en forma de matrices de intensidades de 512 x 512 píxeles o ventanas de éstas que deben de ser filtradas manualmente y suavizadas para eliminar las interferencias producidas mediante un programa de tratamiento digital. También permite la obtención de series temporales de una línea, mediante la cual se pueden estudiar las ondas de borde y la zona de “swash”.

A partir de las imágenes filtradas y corregidas se realizan los cálculos numéricos y estadísticos para la determinación de cada parámetro. El análisis de imágenes de vídeo tiene muchas aplicaciones hidrodinámicas como:

Estudio de la geometría de la zona de rompientes.

Determinación de la fracción de olas rotas.

Estudio de la advección de trazadores lagrangianos (boyas).

P. I. V. (velocimetría por seguimiento de partículas).

Análisis de ondas de borde.

Determinación de coeficientes de dispersión horizontales.

Para el postproceso digital se utilizaron principalmente tres programas o “software” “DigImage”, “TICE” y “Kd”. A continuación se explican brevemente las características y aplicaciones de cada uno.

5.3.1 DigImage

DigImage es un sistema de digitalización y procesamiento de imágenes especialmente concebido para analizar flujos de fluidos en laboratorio. Fue desarrollado por el “Cambridge Environmental Research Consultants Ltd.”. Tiene una estructura de menú que permite acceder de forma estructurada a sus diferentes aplicaciones. Además ofrece las sentencias de seguimiento más comunes automáticamente y opciones de ayuda, agilizando y facilitando su empleo.

Este programa incluye las aplicaciones de procesamiento de imágenes comunes en estudios de dispersión turbulenta, chorros, plumas y flujos estratificados como las que se citan a continuación.

MANIPULACIONES

Distintas formas de capturar imágenes:

- Con control manual o por ordenador.
- Con un cierto retraso o a un tiempo especificado.
- Simples o una secuencia.
- Instantáneas o promediadas temporalmente.
- Manipuladas mediante operaciones lógicas o aritméticas.

Exponer imágenes temporalmente en 16 “buffers” (memoria extendida que permite visualizar una imagen):

- Imágenes completas o partes de éstas, denominadas ventanas.
- En verdadero color o escalas de falso color en función de la intensidad.
- Aumentadas 2, 4 y hasta 8 veces.
- Por la pantalla de la TV o por el monitor del ordenador.
- Con distintas escalas vertical y horizontal.
- En forma de mosaico de varias imágenes o ventanas.
- Estática o a modo de película de los “buffers” seguidos.

Guardar el contenido de los “buffers” en un fichero:

- Las imágenes completas o ventanas de ellas.
- En un fichero.PIC o fichero.BMP.
- Salvar todos los “buffers” en una serie.
- Reproducir imágenes virtuales a partir de un fichero de intensidades.

Facilidades de manipulación para el diseño e impresión:

- Añadir texto.
- Seleccionar parte de una imagen.
- Pegar rectas, marcar contornos, curvas, bandas.
- Crear un fichero legible por una impresora de chorro de tinta.
- Borrar un buffer.
- Copiar la imagen de un “buffer” o una ventana en otro.
- Duplicar o rellenar regiones delimitadas por una isolínea.

CALIBRACIONES

Del campo de iluminación:

- Correcciones por la divergencia de los rayos.
- Correcciones por la atenuación de la luz al penetrar en la mancha.
- Correcciones por variaciones del fondo.

Correlación de la intensidad con la concentración de trazador:

- Con imágenes de calibración o mediante ajustes por fórmulas o mapas.

De las intensidades.

- Crear nuevas escalas de falso color para la intensidad.
- Reajustes del rango para aprovechar mejor la escala de grises.
- Recodificación de los colores básicos: rojo, verde y azul.

Del campo de coordenadas:

- Con funciones bidimensionales para ajustar las coordenadas píxel a las reales.
- Introducción de puntos de referencia para establecer coordenadas relativas.

TRANSFORMACIONES:

Computacionales entre varias imágenes:

- Operaciones lógicas y aritméticas entre dos imágenes.
- Promediados temporales de series continuas de imágenes.
- Promediados entre una serie de buffers.

- Crear y aplicar máscaras a imágenes.
- Combinar imágenes mediante una fórmula.

Filtros:

- De convolución básicos para suavizar contornos.
- Morfológicos: máscaras, erosión, dilatación.
- De entrelazado para evitar que la imagen vibre entre los dos campos que la componen.
- De paso bajo o sobre una intensidad umbral.
- De Fourier para realizar análisis espectrales.

Según isolíneas de intensidad:

- Localizar y marcar una o todas las isolíneas de una intensidad.
- Rellenar todo el interior o una franja con cierta intensidad.
- Eliminar los contornos pequeños.
- Ajustar el contorno a una curva por mínimos cuadrados.

Visuales para realzar el contenido:

- Invertir la escala de intensidades.
- Extender la escala de intensidades en un intervalo.
- Redefinir la escala de falso color.

TÉCNICAS DE ESTUDIO

Identificación de puntos:

- Posicionamiento de puntos mediante el cursor.
- Obtener sus características por monitor: coordenadas, intensidad, media y desviación respecto a su entorno.
- Crear ficheros de coordenadas e intensidad.

Estadísticas:

- De regiones definidas por un contorno.
- Centroides de ventanas.
- Velocimetría de partículas.
- Intensidad media y momentos de intensidad, por filas y/o columnas.
- Semejanza entre dos imágenes, por diferencias o por correlaciones cruzadas.
- Correlación entre variables.
- Longitudes características y dimensiones fractales 1D o 2D.

Representaciones de intensidad de secciones específicas:

- De una fila y una columna específicas, de una curva parametrizada, o 3D.
- Visualizar el gráfico sobre la misma imagen o en otro buffer.
- Guardar los datos en un fichero de datos.

Transformaciones de Fourier:

- 1D con resolución completa.
- 2D con resolución de 256*128.

Series temporales:

- De imágenes, líneas, puntos especificados o de puntos de máxima intensidad.
- A intervalos regulares de tiempo o a tiempos especificados.
- Tomas instantáneas o promediadas.

- Con control manual o por ordenador.

Seguimiento de partículas y determinación de sus trayectorias y velocidades:

- De partículas determinadas manualmente o por caracterizarse con cierta intensidad.
- Durante cierto tiempo o longitud.

Además, ofrece la posibilidad al usuario de desarrollar programas "FORTRAN" e introducirlos en el sistema.

5.3.2 "TICE"

T.I.C.E. (Técnica de análisis de Imágenes para la obtención del Coeficiente de dispersión Experimentalmente)" es un programa Fortran, para la manipulación de las ventanas de las imágenes obtenidas con DigImage, desarrollado por Bahia (1997). Está destinado especialmente al estudio de dispersión de trazadores en la zona costera.

La información procedente de una imagen digitalizada se encuentra en forma binaria. Para manipularla es conveniente reorganizar la información en forma de una matriz. Esta es una de las características principales del programa. En la figura 5.3 se puede observar una mancha digitalizada mediante DigImage, la matriz correspondiente a la intensidad de cada píxel y la matriz filtrada por TICE.

A pesar del gran número de aplicaciones que posee DigImage, carece de flexibilidad para el tratamiento de información puntual, a nivel de unos pocos píxels. Con la finalidad de superar estas dificultades y agilizar la metodología de análisis visual se elaboró TICE. El programa recoge todas las manipulaciones, correcciones y análisis necesarios para el estudio de la dispersión de trazadores y los aplica de forma ordenada. Muchas de estas aplicaciones también las recoge DigImage pero de forma aislada.

Además TICE procesa los datos de esta matriz utilizando algoritmos matemáticos que permiten obtener más información de la imagen.

A continuación se muestran las principales aplicaciones del programa:

- Corregir globalmente los píxels con intensidad superior a cierta intensidad de corte.
- Recortar la matriz de intensidades de forma más exacta.
- Corregir distorsiones locales que alteren el análisis.
- Realizar el análisis numérico-estadístico, de las matrices originales y corregidas, calculando su centro de gravedad, varianzas, covarianza y desviaciones.
- Obtener la evolución del coeficiente de dispersión de una serie de manchas.
- Transformación de coordenadas.
- Elaboración de gráficos de los resultados.

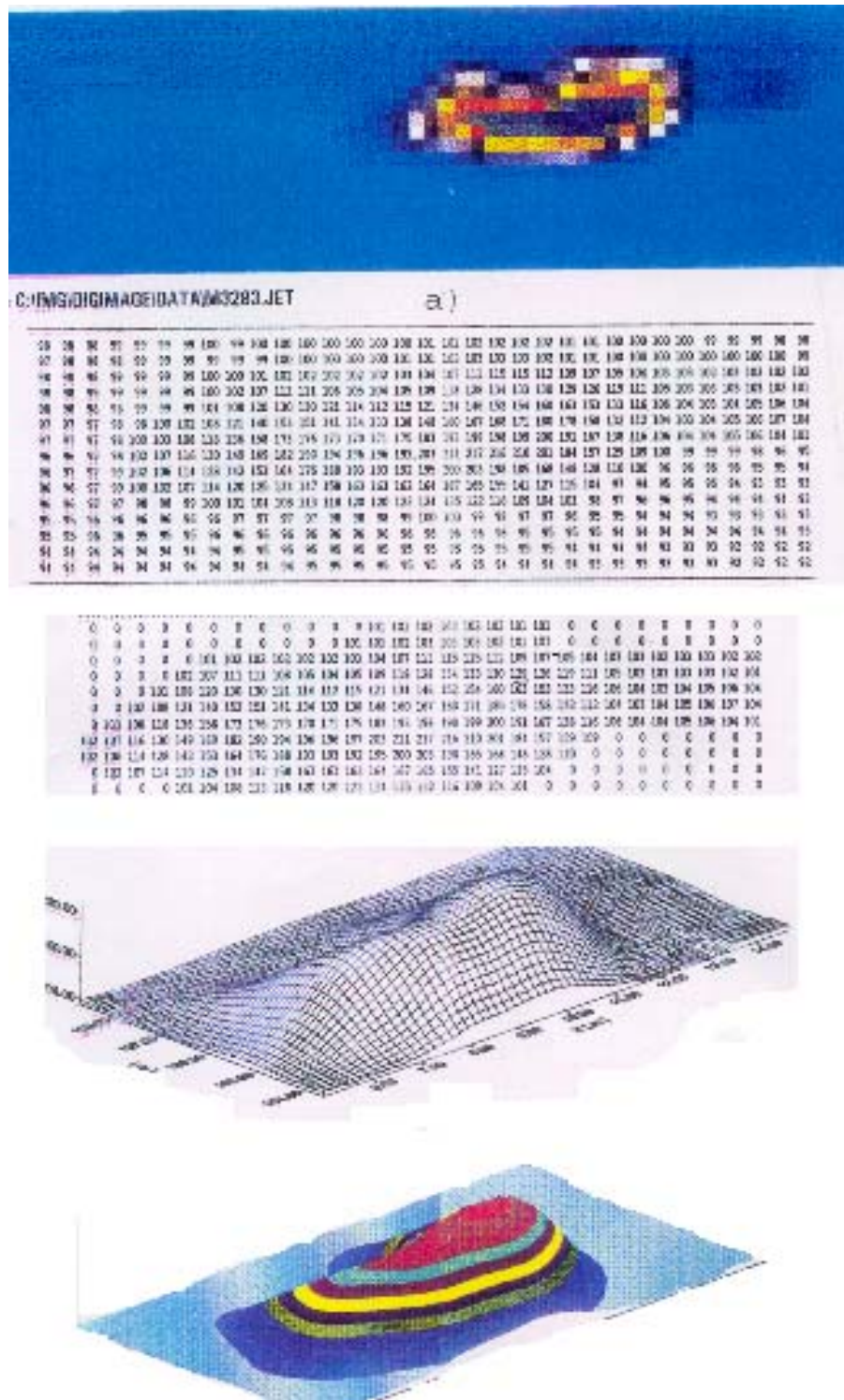


Figura 5-3 Proceso de análisis de imágenes de una mancha. Bahía (1997)

5.3.3 Kd.

Para el análisis de los experimentos de campo de esta tesis se desarrolló un programa basado en TICE (Diez 1998), de forma que permite un uso generalizado para distintas manchas e incorpora más aplicaciones. Además, el programa va acompañado de un diccionario de variables para que el usuario pueda saber cómo se calcula cada parámetro. La nomenclatura no tiene nada que ver con la propuesta en TICE, pues hubo variables que no se pudieron descifrar y se hizo por completo el programa.

Las nuevas aplicaciones son principalmente:

-Corregir globalmente los píxels con intensidad superior o inferior a cierta intensidad de corte. TICE solo fijaba un umbral inferior, pero puede ser interesante fijar uno superior para eliminar reflejos o espuma.

-Corregir distorsiones locales que alteren el análisis, no sólo a nivel puntual, píxel a píxel, sino que también permite eliminar una subventana.

-Eliminar las filas y columnas nulas del contorno. Esto es útil en casos de manchas muy grandes pues, no cabe toda la matriz en la pantalla y así se hace más pequeña.

-Calcular las magnitudes significativas de la mancha, evolución de los diámetros longitudinal y transversal de la mancha.

-Obtener ficheros de resultados por separado, por un lado las manchas filtradas y por otro los parámetros característicos de la mancha. Esto facilita su posterior manipulación.

Los datos se introducen mediante ficheros de datos externos, inicio y transformación de coordenadas, sin necesidad de modificar el programa cada vez en el fichero de inicio debe haber información para cada ventana de:

- El tiempo transcurrido desde el vertido. Normalmente, en la copia de seguridad, se sobregraba un contador temporal continuo; pero en casos en que la mancha se desplaza hacia la esquina superior izquierda se ha de quitar. En este caso, se puede obtener por diferencia con el contador del magnetoscopio.

- Nombre del fichero de transformación de coordenadas. Normalmente los experimentos se registran desde cámaras estáticas, de forma que el campo visual no cambia; pero es posible que la cámara se mueva u oscile, como en el caso de la cámara suspendida desde un globo aerostático. Así que la serie de imágenes no responde exactamente al mismo campo visual y la transformación de coordenadas es distinta.

- Coordenadas de la esquina superior izquierda e inferior derecha. Estos datos salen por el monitor del ordenador en el momento de capturar la ventana y hay que tomarlos. Sirven para dos cosas: primero obtener el formato del fichero binario para poder leerlo y segundo para conocer la posición relativa de la ventana en la pantalla, de cara a determinar su advección y a poder hacer la transformación de coordenadas (pues no es lineal).

- Intensidad de corte. Se define el contorno de la mancha mediante una isolínea de intensidad. Esta es específica para cada ventana, pues se produce una variación temporal y espacial del fondo. Para determinarla es necesario posicionarse en cada una y seguir su contorno para ver si se verifica. Éste es un parámetro que se estima subjetivamente. Cuando la concentración es baja puede resultar difícil de elegir.

- Factor de corrección correspondiente al suavizado del decaimiento de la intensidad. Se toma un punto de la mancha, el de intensidad máxima, y se asume que decae de forma continua. Las oscilaciones se suavizan interpolando una función polinómica. El factor de corrección será el cociente entre el valor bruto de la intensidad máxima y el interpolado. Esto supone que se ha de determinar la intensidad máxima, lo que se hace corriendo el programa con un factor unitario, mediante histogramas de frecuencias en DigImage o visualmente explorando la mancha. Este método es el mejor, pues permite establecer criterios de selección específicos. En ocasiones se trata de una zona con varios píxels, casos saturados, y en otras presenta varios centros oscilando entre ellos; este efecto se da al pasar una ola, pues no coincide la zona de concentración máxima con la posición más normal a la iluminación.

En el de transformación de coordenadas figuran:

- Los coeficientes necesarios para la transformación de cada eje. Estos datos los proporciona DigImage al introducirse en la opción (P)(W)(D) "Display world coordinate mapping". El programa está elaborado para que se tome una función de transformación bicuadrática con ocho coeficientes para cada eje, opción 6 del (P)(W)(M) "Mapping function".

- Las coordenadas en píxel de los puntos fiduciales en la imagen. Los puntos se han de poder identificar en la imagen con un píxel. Una de las comprobaciones que se ha de realizar durante los experimentos es que efectivamente los puntos de referencia se reconocen en la imagen. Posteriormente, como suelen ocupar más de un píxel, se ha de adoptar un criterio para elegir uno, por ejemplo el de máxima intensidad o el más central.

- Las coordenadas topográficas o locales de los puntos correspondientes en el terreno. Los experimentos se posicionan topográficamente respecto un sistema de coordenadas locales. Es conveniente realizar un buen croquis para identificar los puntos y numerarlos para distinguirlos.

Existen programas especializados en la transformación de coordenadas y de calibración de cámaras como el de Bouquet (2004 a).

5.3.4 DigiFlow

Para el análisis de fluidos mediante el seguimiento de partículas iluminadas se empleó el programa específico DigiFlow. Este correlaciona imágenes consecutivas dando un mapa de velocidades, y a partir de él, un mapa de vorticidad. Este proceso se realiza mediante la aplicación de máscaras de intensidad que captan las partículas iluminadas aislándolas del fondo más oscuro, para después determinar su posición dentro de unos límites más o menos cercanos, basándose en medias de intensidad y mecanismos estadísticos.

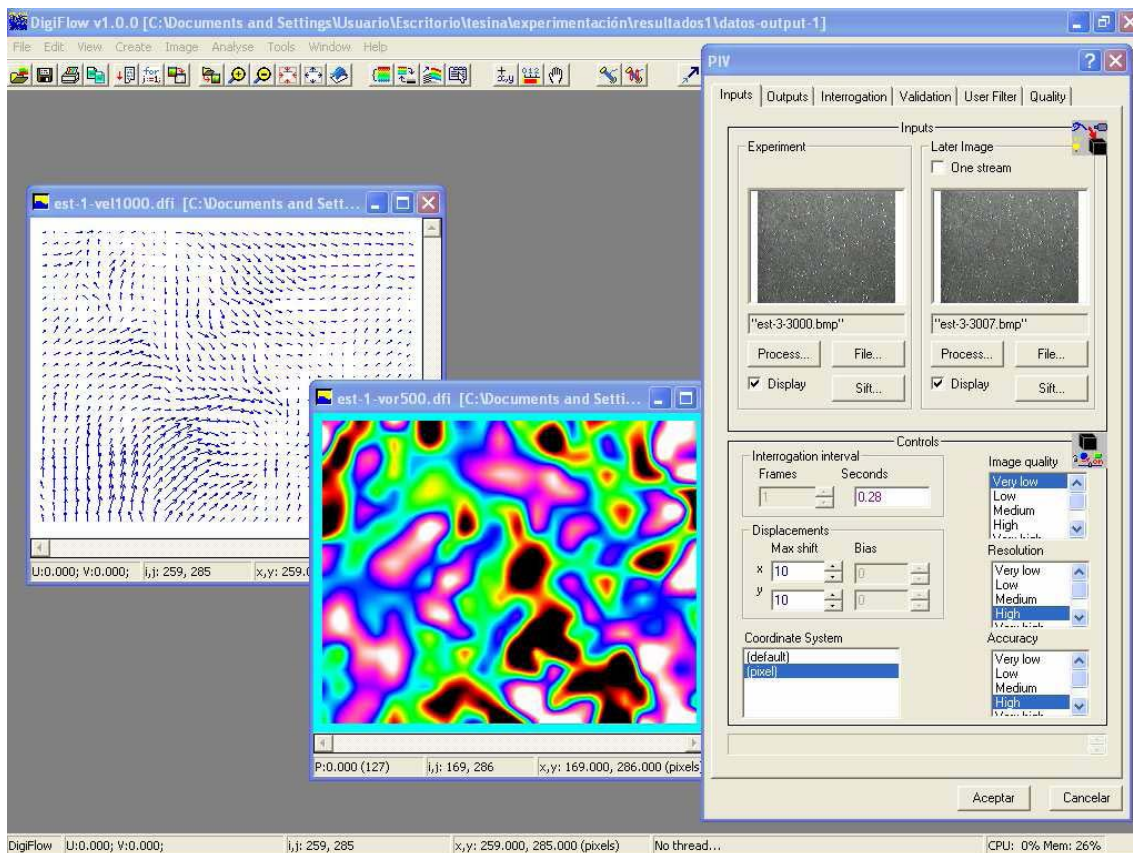


Figura 5-4 Captura de una pantalla de DigiFlow.

5.4 POSTPROCESO DIGITAL

Ahora que ya se conocen cuales son las herramientas de cálculo, se mostrará como emplearlas para aplicarlas al campo de la Hidrodinámica en la zona costera. A continuación se describirán las distintas fases seguidas durante el postproceso.

5.4.1 Tratamiento previo de las cintas.

En primer lugar hay que hacer un duplicado de las cintas de vídeo que contienen el registro de los experimentos pues, según las leyes de Murphy, es probable que se borren, sobregaben, deterioren o pierdan. Además, al manipularlas, sufren un desgaste que puede afectar a la calidad digital.

Aprovechando que se hace la copia es conveniente agregarle un indicador temporal para no tener que rebobinar toda la cinta cada vez que se quiera ir a un punto. Durante la grabación no se insertó pues, en ocasiones, esa parte de la pantalla es dominio de interés.

A posteriori se puede poner pues se tiene el original sin nada. Como no se disponía de un controlador temporal, se ingenió un mecanismo que introdujera la hora. El magnetoscopio dispone de una memoria para empezar a grabar y acabar a un tiempo especificado, presionando una tecla llamada "screen display". Previamente hay que poner el contador a cero al inicio de la cinta.

Al introducir o extraer una cinta del aparato se pone a cero automáticamente, pero no siempre la cinta está en el comienzo. Manteniendo presionada la tecla de inicio "begin" o final "end", se va registrando un contador de la hora, minuto y segundo de la reproducción en el lugar correspondiente. Al dejar de presionar se para, por lo que hay que fijarlo como se pueda. Se puede utilizar uno como contador continuo y otro como tiempo de referencia, por ejemplo del instante en que se vierte el trazador.

Una vez se obtuvieron todos los registros se elaboró un informe que describía el contenido de las cintas, experimentos, calidad, condiciones meteorológicas, etc. Facilitando la elección del test que se va a analizar.

Hay que comprobar que se dispone de todos los datos necesarios como: puntos suficientes para poder hacer una transformación de coordenadas, un dominio visual sin muchas distorsiones, un fondo suficientemente homogéneo, poco reflejo o espuma, etc.

5.4.2 Transformación de coordenadas

Una componente crucial en cualquier tipo de medición es la posibilidad de referir las medidas a un sistema de referencia estándar. En el caso del análisis por imágenes, hay que hacer una correspondencia que permita identificar cada punto de la imagen con una posición real.

Para poder pasar de una imagen bidimensional a una realidad tridimensional se debe realizar alguna hipótesis adicional, ya que todos los puntos de un rayo óptico tienen el mismo en la imagen. Normalmente se establece una correspondencia entre los puntos de una superficie de geometría conocida y los de la imagen de ésta.

Los ejes de coordenadas matriciales "I" y "J" tienen su origen en la esquina superior izquierda de la pantalla y corresponden, el "I" al número de fila, y el "J" al número de columna.

Para realizar dicha correspondencia se pueden emplear distintos tipos de transformación de coordenadas entre ambos sistemas, contenidos en el menú (P) "Coordinate System Mapping" opción (W) "World Coordinates". Las transformaciones predefinidas por Digimage son funciones polinómicas, pero permite programar otro tipo de transformaciones.

En cualquier tipo de transformación es necesario determinar sus coeficientes mediante puntos fiduciales, de los que se conozca su posición, y que puedan ser identificados en la imagen.

DigImage permite obtener estos coeficientes a partir de la identificación mediante el cursor e introducción de la posición de los puntos fiduciales, opción (L) "Locate world coordinate mapping". El programa permitirá elegir el tipo de función de transformación

en función del número de puntos, de forma que haya un número de coordenadas reales de puntos igual o superior al número de coeficientes de las dos funciones de transformación, una de cada eje. También permite el proceso inverso, a partir de ciertos valores de los píxel construir una geometría virtual.

Para facilitar el proceso cuando se dispone de gran número de puntos de referencia, el programa permite reconocer estos a partir de un umbral de intensidad gracias al submenú (P) "Reference points".

Para estimar el error absoluto de la transformación, se deben comparar las coordenadas de la transformación con las topográficas de puntos no involucrados en la transformación. El error relativo cometido dará cuenta de la precisión con que se trabaja. Es conveniente que los puntos estén uniformemente distribuidos para evitar zonas con grandes errores por la falta de puntos de referencia cercanos.

Una vez realizada la transformación, para cada píxel en que se posicione el cursor, DigImage ofrece las coordenadas en el sistema de píxel, topográfico (e.g. UTM) y local respecto a puntos de referencia.

TRANSFORMACIÓN POLINÓMICA

La inclinación de la cámara, la deformación de la lente gran angular, el ángulo de inclinación respecto de una vista cenital y la curvatura terrestre son causas de distorsión entre las coordenadas topográficas y las coordenadas matriciales de los puntos de la imagen, "píxels".

La transformación polinómica es muy usada en el campo de teledetección espacial, ya que la curvatura terrestre es perceptible y se dispone de gran número de puntos fiduciales. También es muy efectiva para imágenes captadas con gran angular.

Por ejemplo, para una transformación bicuadrática como la que emplea K_d son necesarios ocho puntos.

$$X_{wc} = A_1 + A_2 X + A_3 Y + A_4 X Y + A_5 X^2 + A_6 X Y^2 + A_7 X^2 Y + A_8 X Y^2 \quad \text{Ec. 5-21}$$

$$Y_{wc} = B_1 + B_2 X + B_3 Y + B_4 X Y + B_5 X^2 + B_6 X Y^2 + B_7 X^2 Y + B_8 X Y^2 \quad \text{Ec. 5-22}$$

Los datos necesarios para la transformación de coordenadas correspondiente a las imágenes del globo y la superposición de la malla de la transformación inversa sobre la imagen se muestran en la figura 5.4.

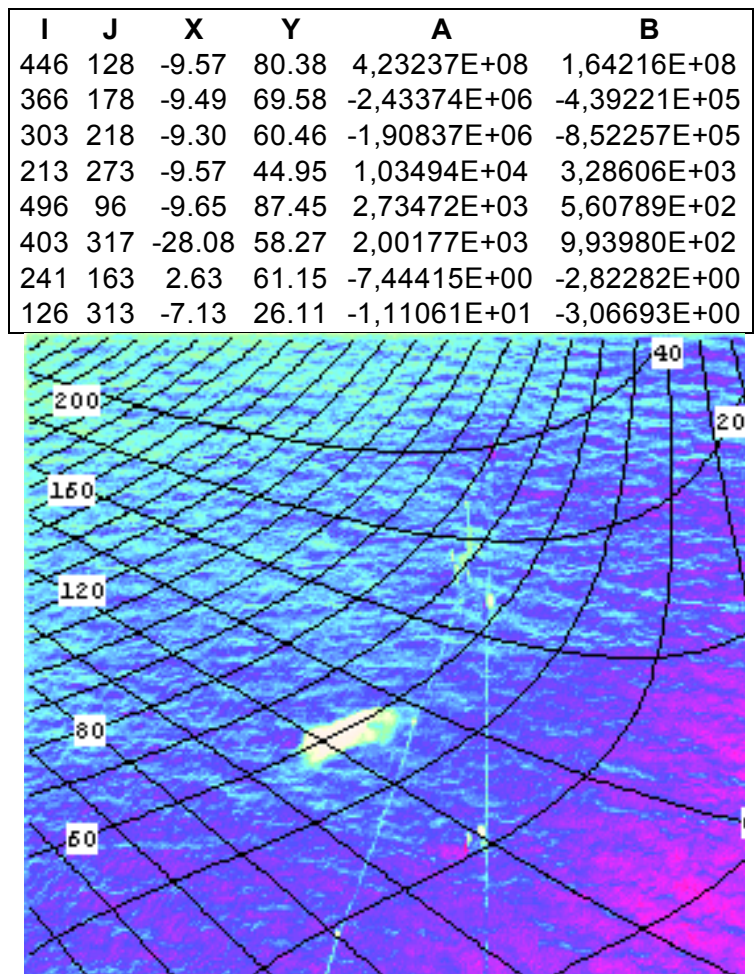


Figura 5-4. Datos y malla de Transformación de coordenadas superpuesta. Caso del globo.

APROXIMACIÓN TOPOGRÁFICA

En la ingeniería marítima de campo cercano, cuando se puede despreciar la curvatura terrestre, no se emplea gran angular y el número de puntos fiduciales es restringido son más fiables los principios de la fotogrametría.

Geoméricamente se puede derivar la relación entre la proyección en el plano de la cámara y una superficie como la mostrada en la figura 5.5. Suponiendo que el centro de la cámara (x_c, y_c, z_c), el centro de la imagen (i_0, j_0) y el punto de enfoque (x_p, y_p, z_p) están alineados y siendo los ángulos de rotación (α, γ, τ), se derivan las ecuaciones de colinealidad:

$$i-i_0 = -C_i (m_{11} (x-x_c) + m_{12} (y-y_c) + m_{13} (z-z_c)) / (m_{31} (x-x_c) + m_{32} (y-y_c) + m_{33} (z-z_c)) \quad \text{Ec. 5-23}$$

$$j-j_0 = -C_j (m_{21} (x-x_c) + m_{22} (y-y_c) + m_{23} (z-z_c)) / (m_{31} (x-x_c) + m_{32} (y-y_c) + m_{33} (z-z_c)) \quad \text{Ec. 5-24}$$

$$m_{11} = \cos\alpha \cos\tau + \sin\alpha \cos\gamma \sin\tau \quad \text{Ec. 5-25}$$

$$m_{12} = -\sin\alpha \cos\tau + \cos\alpha \cos\gamma \sin\tau \quad \text{Ec. 5-26}$$

$$m_{13} = \sin \gamma \cos \tau \tag{Ec. 5-27}$$

$$m_{21} = -\cos \alpha \sin \sigma + \sin \alpha \cos \gamma \cos \tau \tag{Ec. 5-28}$$

$$m_{22} = \sin \alpha \sin \tau + \cos \alpha \cos \gamma \cos \tau \tag{Ec. 5-29}$$

$$m_{23} = \sin \gamma \cos \tau \tag{Ec. 5-30}$$

$$m_{31} = \sin \alpha \sin \gamma \tag{Ec. 5-31}$$

$$m_{32} = \cos \alpha \sin \gamma \tag{Ec. 5-32}$$

$$m_{33} = -\cos \gamma \tag{Ec. 5-33}$$

$$C_i = f / \lambda_i \quad y \quad C_j = f / \lambda_j \tag{Ec. 5-34}$$

donde f es la distancia focal efectiva y λ_i, λ_j son los factores de escala.

En estas ecuaciones hay 11 parámetros intrínsecos: $(x_c, y_c, z_c, i_0, j_0, \phi, \tau, \sigma, f, \lambda_i, \lambda_j)$, de manera que para su resolución son necesarios 6 puntos fiduciales.

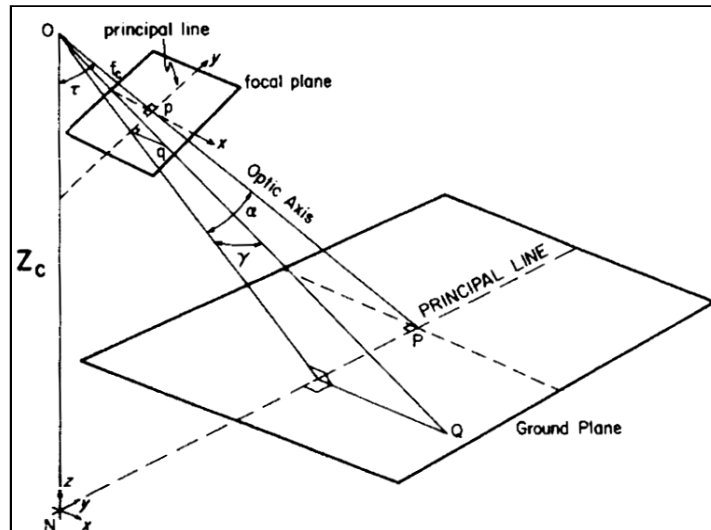


Figura 5-5. Esquema de la relación entre el plano de la imagen y el del terreno.

Las ecuaciones se pueden simplificar de la siguiente forma:

$$i = (L1x + L2y + L3z + L4) / (L9x + L10y + L11z + 1) \tag{Ec. 5-35}$$

$$j = (L5x + L6y + L7z + L8) / (L9x + L10y + L11z + 1) \tag{Ec. 5-36}$$

En el mar es posible tomar puntos de referencia con marcas de GPS pero su captación es difícil ya que supone una gran coordinación entre los medios de navegación y los de filmación. Sin embargo, en el mar se puede hacer una hipótesis adicional que permita resolver el sistema de ecuaciones. A una escala de pocos Km se puede suponer que la superficie media del mar es horizontal, $z=0$.

$$i = (L1x + L2y + L4) / (L9x + L10y + 1) \tag{Ec. 5-37}$$

$$j = (L5x + L6y + L8) / (L9x + L10y + 1) \tag{Ec. 5-38}$$

quedando solo 8 incógnitas que requieren 4 puntos fiduciales para su resolución.

Si es posible tomar más puntos, se emplea un método iterativo de ajuste por mínimos cuadrados para obtener los coeficientes óptimos. Para esta tesis se desarrolló un pequeño programa Fortran para su cálculo (Gauss.for).

La bondad del grado de ajuste se mide por la importancia de los residuos, la diferencia entre el valor estimado y el real. Para valorarlo, se puede tomar como indicador el promedio del error medio cuadrático (RMS) para cada uno de los puntos de control. Pruebas realizadas en laboratorio para calibrar el programa Gauss.for con una imagen de una cuadrícula de 40x40cm del suelo permitieron obtener un error inferior al 1% (figura 5.6).

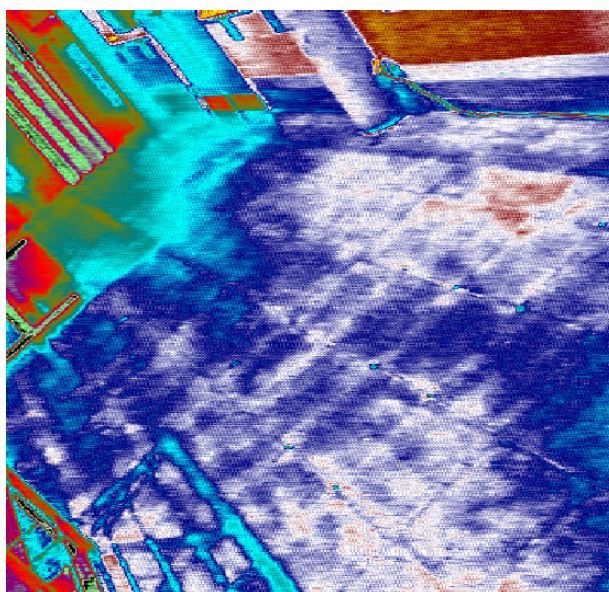


Figura 5-6. Imagen de una retícula del suelo para calibrar la transformación.

Los datos de calibración de la imagen 5.6 son los siguientes:

X(i),	Y(i),	I(i),	J(i)
100.00	100.00	409.00	260.00
140.00	100.00	331.00	315.00
180.00	100.00	255.00	367.00
220.00	100.00	183.00	415.00
100.00	140.00	375.00	232.00
140.00	140.00	305.00	282.00
180.00	140.00	238.00	330.00
220.00	140.00	174.00	378.00
100.00	60.00	454.00	294.00
140.00	60.00	360.00	350.00
180.00	60.00	277.00	410.00
220.00	60.00	195.00	466.00

Tabla 5-1. Datos de calibrado de la imagen de la Figura 5.6..

De estos datos se extraen los parámetros básicos de la transformación:

- Punto principal X_p, Y_p 1.882982 -1.339014
- Distancias principales C_x, C_y 2.198830 1.551061
- orientación $AngX, AngY, AngZ$ 76.021550 -2.049378E-02 119.669900

Es importante tener en cuenta que todas las transformaciones en los bordes de la imagen pueden producir errores importantes, por lo que es recomendable no tener en consideración al menos el 10% periférico.

5.4.3 Selección de las imágenes a analizar.

Para el análisis hay que digitalizar una serie de imágenes instantáneas. El ordenador las captura en formato digital con distintos modos, simple o secuencial, a un tiempo fijo o con cierto retraso. Todos ellos se recogen en el submenú (G) "Grab and Display Menu" de DigImage. Dentro del modo secuencial permite almacenar hasta 16 imágenes distintas en "buffers" (espacios de memoria extendida). El "buffer" es el que usa el programa para almacenar información temporal, por lo que es posible perder o sobrescribir la imagen que se guarde en él. El control de adquisición de las imágenes puede ser manual o por ordenador. La resolución temporal de la adquisición es de 5rHz , por lo que este es el mínimo intervalo admisible entre dos imágenes.

En experimentos con algún parámetro cíclico, como el oleaje, puede ser interesante hacer previamente una serie temporal de una fila y/o columna para determinar su periodo y tomar la secuencia con ese período (véase en el apartado de técnicas de análisis, series temporales (T)(L) "Time series of line and/or column").

Para visualizar los "buffers" por la pantalla del televisor debe estar en modo RGB; alternativamente están el modo Line A y Line B, por los que se visualizan las entradas correspondientes a los magnetoscopios, las imágenes reales del vídeo.

Si se desea cambiar de "buffer" no hay más que mover los cursores hacia arriba o hacia abajo, siempre que se esté en el menú (G). También se pueden visualizar por el monitor del ordenador con el modo (G)(D) "Display sequence of buffers". Puede ser interesante mostrar los "buffers" de forma seguida a modo de película. Ésta se puede crear y reproducir con las aplicaciones del menú (T)(M) "Movies".

Para mejorar la visualización se pueden hacer aumentos o "zoom". Esto no supone una mayor resolución sino que se aumenta o disminuye el tamaño del píxel. Para ello se ha de ir al submenú (G)(Z) "Zoom". Aparece una cruz en la imagen que se ha de posicionar en el centro de la zona que se desee ampliar mediante el ratón o con los cursores. Éstos permiten un movimiento de píxel en píxel o más rápido (de 16 en 16), marcando la tecla (S) "Speed toggle". Si se vuelve a marcar (S) se mueve de uno en uno. Una vez colocados en la zona, marcando sucesivamente la tecla IMÁGENES "Enlarge" se va ampliando la imagen hasta 8 veces su tamaño. Para condensarlo, no hay más que marcar la tecla IMÁGENES "Condense" tantas veces como se quiera, hasta volver a la imagen inicial. Por la pantalla del ordenador sale la posición del cursor en coordenadas píxel, reales, reales relativas y polares; además de la intensidad del píxel, la intensidad media de la zona y su desviación.

Las imágenes tienen una resolución de 512 * 512 puntos o "píxels" de manera que suponen matrices muy grandes para su análisis. Trabajar con ellas tiene un coste computacional considerable. Además, normalmente, el interés se centra en una zona concreta pudiendo depreciarse el resto. Por ello conviene trabajar con partes o "ventanas" de dichas imágenes, como el ejemplo de la figura 5.7. Al guardar estas ventanas, DigImage muestra en pantalla las coordenadas de la esquina superior

izquierda y de la inferior derecha. Conviene guardar estos datos para saber el tamaño y ubicación de la ventana e introducirlos en los ficheros de lectura de datos.

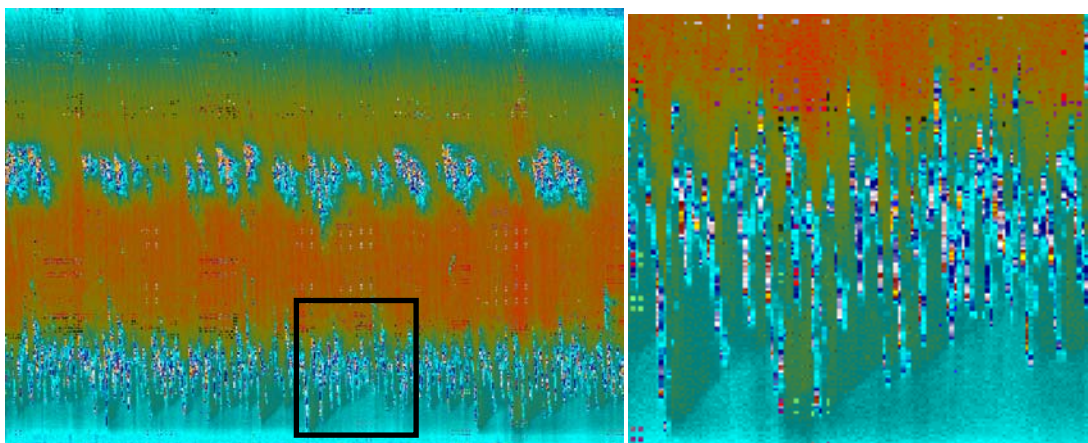


Figura 5-7. Imagen completa digitalizada y Ventana ampliada de la imagen anterior.

Una vez se tienen los “buffers”, se pueden visualizar con distintas escalas de falso color de forma que se obtenga un contraste adecuado. Las escalas de falso color otorgan distintos colores a cada franja de intensidad. El rango de intensidades tiene una resolución de 256 niveles de gris. Hay definidas 16 escalas de falso color a las cuales se accede con el modo (G)(O) “Output Look Table “. Entre ellas está la posibilidad de Blanco y Negro y la del negativo. Para obtener una barra con la escala de intensidad, se ha de salir del submenú y entrar en el (G)(I) “Display intensity scale”.

En una misma pantalla se pueden presentar varias ventanas. De este modo se puede hacer un mosaico de ventanas para observar su evolución y compararlas. El mosaico se puede conseguir de forma automática con la aplicación (G)(J) “Display summary “buffers”automatic” en cuyo caso colocará, en una cuadrícula de tamaño a elegir 2*2, 3*3 o 4*4, por orden los “buffer” almacenados empezando por el que se indique. También permite hacerlo alterando el orden con (G)(L) “Display summary buffers specific”. También se puede construir un mosaico irregular a base de restaurar ficheros de ventanas y colocarlos en distintas posiciones de un mismo “buffer”, opción (K)(L) “Load window fram file” para ficheros.PIC y, opción (K)(B) “Load window 3.x.BMP bit map” para ficheros.BMP.

Tanto la recuperación como el almacenamiento de las imágenes se encuentra en el submenú (K) “Save and restore buffer”.

Para salvar los “buffers” o ventanas de éstos, hay distintas opciones según el tipo de archivo en el que se quiera salvar:

- Fichero.PIC opción (K)(S) “Save buffer to file” o (K)(W) “Write window to file” para una ventana.
- Fichero.BMP opción (K)(C) “Save window 3.x.BMP bit map”. En este tipo de archivo la imagen puede ser reescalada de forma que quede con las proporciones deseadas.

Así mismo se pueden recuperar “buffers” de un archivo.

- Del tipo fichero.PIC opción (K)(M) “Restore buffer to file” o (K)(L) “Load window to file” para una ventana
- Del tipo fichero.BMP opción (K)(B) “ Load window 3.x.BMP bit map”.

Si se han capturado de modo secuencial, se salvan automáticamente como fichero.PIC y con una numeración sucesiva en la extensión, mediante la opción (K)(Y) "Save all buffers" para salvarlos y opción (K)(X) "Load all buffers" para recuperarlos.

5.4.4 Correcciones para eliminar efectos no deseados

A continuación se explica el proceso que se sigue para la eliminación de cada uno de los principales efectos no deseados y/o las correcciones necesarias para preparar las imágenes de forma que se pueda hacer un análisis cualitativo y cuantitativo.

ELIMINACIÓN DEL FONDO

Existe la posibilidad de corregir el efecto que pueden producir una iluminación no uniforme o variaciones del fondo. Esto es de especial utilidad en el caso de estudiar concentración de manchas a partir de la intensidad de luz absorbida al pasar por ella.

DigImage tiene una opción específica para el caso de manchas. (E) "Enhance images" – (D) "Correct dye for background variations". Realiza un ajuste, lineal o logarítmico según se prefiera, entre las intensidades de un "buffer" sin mancha y las de la mancha. También permite calibrar el cero de intensidad.

Se puede separar la mancha del fondo a partir de una imagen sin mancha con una manipulación aritmética de imágenes, opción (G)(M) "Manipulate image", es decir, restando las intensidades de los píxeles correspondientes a cada una.

Si no es posible tener una imagen del fondo, se puede hacer un ajuste polinómico del fondo con IMÁGENES(F) "Fit polynomial to background".

Kd lo realiza aplicando un factor de corrección a toda la mancha. Éste se obtiene por interpolación de una función polinómica en la evolución de la intensidad máxima de la mancha.

AISLAR UNA CELDA SEGÚN UN CONTORNO DE INTENSIDAD CONSTANTE

Mediante DigImage se ha de seguir un proceso para aislar una zona de interés. Ésta ha de venir definida por un contorno de intensidad o se ha de construir por sucesivos contornos de intensidad por zonas o ventanas. A continuación se describen los pasos necesarios para ello:

- El primer paso es ver la imagen posicionándose en los distintos puntos del contorno para tratar de elegir una intensidad de corte, opción (G)(Z) "zoom" & pan/locate positions".
- Después hay que localizar los contornos con esa intensidad de corte que haya en la ventana de interés, opción "Contours".
- Una vez vistos los contornos se seleccionan el o los que interesen para que se guarden los datos en un fichero.DAT con la opción "Locate edge in window".
- Se crea una máscara, es decir una zona blanca o de intensidad 255 en un fondo negro o de intensidad r, según contornos definidos por isolíneas de intensidad, opción (M) " Produce contour mask buffer".

- En el caso de que se desee el fondo, se puede invertir la escala de intensidades con la opción (G)(M)(I) “Invert buffer”.
- Una vez creada la máscara, se aplica con la opción (G)(M)(K) “Use mask buffer”.

En el caso de trazadores, TICE y Kd permiten aislar una mancha a partir de una intensidad de corte de forma directa; Kd después de un filtrado por variaciones del fondo mediante factores de corrección. Toda intensidad inferior a ésta es considerada nula y las superiores se asemejan a la concentración de trazador.

CORRECCIÓN DE PERTURBACIONES LOCALES.

Es frecuente la presencia de perturbaciones locales como manchas en el visor de la cámara de grabación, reflejos o espuma en el agua, que alteran el campo de intensidades. Para su filtrado, DigImage ofrece la opción IMÁGENES(I) “Remove small islands”, en la que se han de localizar una a una las regiones con intensidad menor y mayor a un umbral y, si encierra un área menor a la especificada, la rellena con la intensidad del contorno. Pero no ofrece ninguna aplicación que permita cambiar un píxel, de forma que es necesario recurrir a otros programas específicos.

Tanto TICE como Kd permiten variar la intensidad de un píxel a partir de las coordenadas matriciales relativas al extremo superior izquierdo de la ventana.

ELIMINACIÓN DEL EFECTO DE ENTRELAZADO

Muchos magnetoscopios operan en modo entrelazado. Esto significa que una imagen, o “frame”, se produce por dos campos de vídeo. El primero en transmitirse contiene todas las líneas pares, y el segundo todas las impares. Para cada “frame”, a 25 o 30 Hz, hay dos campos, a 50 o 60 Hz. Normalmente, el obturador de una cámara de vídeo está abierto en un ciclo igual que el campo y la información que contiene corresponde a tiempos ligeramente distintos. Si el flujo evoluciona rápidamente, esta pequeña diferencia de tiempo puede suponer un cambio importante de la imagen. Un reflejo en ella indica esta situación. Para evitarlo hay que considerar un solo campo en el “frame”, el par o el impar, filtrando el otro o bien hacer un promediando entre ambos, que se puede hacer en toda la imagen o en una ventana. DigImage tiene un submenú específico (F)(I) “Interlace filters”.

CORRECCIÓN DE LA ESCALA DE INTENSIDADES

El caso más sencillo es aquél en el que sólo se quiere ajustar el rango de intensidades a un intervalo mediante un re-escalado lineal, opción IMÁGENES(L) “Linear intensity changes”. Pregunta los coeficientes de la transformación ($p=a+bp$), siendo “a” la intensidad correspondiente al negro (imágenes por defecto) y “b” el factor de reescalado (por defecto (1) deja la escala de intensidades entre r y 255). También se puede hacer de forma automática, en base al rango de intensidades de una ventana especificada, con la opción (D)(I) “Alter intensity range for dumping”.

DigImage dispone de un submenú (P)(I) “Intensity calibrations” que permite relacionar intensidades digitales con las absolutas y con otros campos externos asociados a éstas, como la concentración de un trazador.

Una manera consiste en elaborar una escala de intensidades y/o concentraciones a base de ventanas a las que se les asigna un valor de intensidad y de concentración determinados. Primero se ha de inicializar la serie con (P)(I)(I) "Initialise intensity mapping", después se localizan las ventanas con (P)(I)(L) "Locate intensity reference" y por último se aplican a una imagen con (P)(I)(T) "Transfer intensities to new image". Si posteriormente se quieren cambiar los valores, se puede hacer con (P)(I)(U) "Update reference intensities manually" para las intensidades y con (P)(I)(V) "Update reference concentrations" para las concentraciones.

También permite hacerlo mediante funciones 2D. El tipo de función se introduce como una sucesión de términos, especificados según el tipo de función deseada, por unos coeficientes de ajuste. Los términos los introduce el usuario y los coeficientes de ajuste los calcula el programa. Para introducir la expresión del mapa de intensidades se ha de escoger la opción (P)(I)(M) "Mapping function for pixel intensities" y para el de concentraciones la opción (P)(I)(N) "Mapping function for concentrations".

SUAVIZADO DE LOS CONTORNOS

Para uniformizar variaciones locales y suavizar los contornos de la imagen se puede aplicar un filtro de paso bajo a una convolución que reemplaza la intensidad de un píxel por una combinación lineal de las de su entorno. El menú de DigImage ofrece distintos filtros de convolución en (F) "Convolution filters":

- Filtro de bajo paso, paso alto o laplaciano.
- Con matriz predefinida que pondera con 5 píxels, opción (1) o 9, opción (2), o por definir como un número de filas por columnas, opción (L).

También permite introducir una combinación lineal para filtrar, opción (U).

5.5 TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LAS IMÁGENES

Hay numerosos parámetros, que si presentan evidencias visuales, se pueden cuantificar con un adecuado análisis de las imágenes previamente tratadas. En caso negativo, se pueden emplear trazadores que visualicen el efecto, por ejemplo boyas o manchas.

5.5.1 Coordenadas de puntos

Como se ha visto en el apartado de transformación de coordenadas, es posible establecer un sistema de coordenadas reales a partir de cierto número de puntos fiduciales. De esta manera se pueden saber las coordenadas de cualquier punto de la imagen y, por diferencia, la distancia relativa y longitudes características del contenido de la imagen, es decir, su geometría. Los datos del punto como intensidad, coordenadas píxel, reales, relativas y polares se pueden guardar en un fichero.DAT, que puede ser nuevo o viejo, permitiendo acceder al fichero y luego seguir añadiendo más puntos, opción (P)(P) "Determine the coordinates of a point" y con IMÁGENES(P) "Points with additional data" se permite introducir comentarios a posteriori. Además, identificando píxels de distintas imágenes, es posible determinar trayectorias de puntos especificados y el cálculo de sus velocidades.

La posición de un objeto en la imagen es función de la orientación de la cámara respecto al terreno y de las características ópticas de la cámara. Las ecuaciones no están bien definidas, pues se ve un campo 3-dimensional en una imagen plana. Por ello es necesario añadir información o dejar la coordenada vertical como incógnita. En la costa se puede asumir como coordenada vertical el nivel del mar.

El proceso de rectificación o transformación de coordenadas consiste en una serie de cálculos geométricos para asociar una posición topográfica (x,y,z) a cada elemento o píxel de la imagen (I, J). Las teorías en que se fundamenta este proceso fueron desarrolladas por Lippman y Holman (1989). Para establecer esta relación es necesario conocer los parámetros ópticos de la filmación:

- τ ángulo entre el eje óptico de la cámara y la vertical
- f_c distancia focal
- α ángulo cenital respecto al eje óptico de cada punto
- γ ángulo acimutal respecto el eje óptico de cada punto

$$XQ = Zc \tan (\gamma) / \cos (\tau + \alpha) \quad \text{Ec. 5-39}$$

$$YQ = Zc \tan (\tau + \alpha) \quad \text{Ec. 5-40}$$

$$\alpha = \arctan (yq / fc) = \arctan (xq / (yq^2 + fc^2)^{1/2}) \quad \text{Ec. 5-41}$$

Los parámetros visuales referentes a cada punto se pueden deducir a partir de otros más sintéticos:

- δ ángulo del dominio visible de la cámara
- ϕ ángulo acimutal de rotación entre los sistemas de coordenadas
- θ ángulo cenital de la cámara respecto al horizonte

La valoración de estos parámetros en campo es muy difícil. Usualmente están sometidos a errores de unos 0.25° en τ , 0.5° ϕ y 0.5% en f_c .

Se llaman cámaras paramétricas a aquellas en que se conocen con exactitud sus parámetros ópticos τ , δ , ϕ y θ , como las empleadas en los servicios de cartografía. En el caso de disponer de cámaras no paramétricas, la restitución se puede realizar a partir de puntos de control del terreno GCP (Ground control Point). Por cada punto se obtiene dos relaciones (U, V) vs. (x, y, z). Las coordenadas (U, V) de un píxel de la pantalla están referidas a un sistema con origen en la esquina superior izquierda con eje U vertical descendente y V horizontal diestro. Para cada píxel se realiza una transformación por triangulación basada en la aproximación de Walton:

$$U = (A x + B y + C z + D) / (E x + F y + G z + 1) \quad \text{Ec. 5-42}$$

$$V = (H x + K y + L z + M) / (E x + F y + G z + 1) \quad \text{Ec. 5-43}$$

Estas expresiones contienen once coeficientes de forma que son necesarios seis puntos para resolver el sistema. En el caso de cámara paramétrica se dispone de siete relaciones, por lo que con dos puntos de control es suficiente (un origen y una orientación).

Para obtener un óptimo ajuste se suelen tomar más puntos de control de los estrictamente necesarios. Con cada conjunto de seis se obtiene una serie de coeficientes, de forma que es posible establecer varias geometrías. Para elegir la

mejor se compara la forma y posición de los picos de intensidad de un perfil transversal a la orilla. Se descartan aquellas geometrías que se desvíen mucho de la media y se promedia el resto o se toma aquella cuya suma de diferencias sea inferior.

Para valorar el error relativo, se compara la posición estimada de los puntos de control no empleados en la restitución con la posición real.

La resolución espacial es el área abarcada por un único píxel. El dominio se divide en una matriz de 640*480 celdas o píxels. La resolución no es la misma en toda la pantalla, pues la transformación de coordenadas puede acumular más puntos en unas zonas que otras, en particular cerca del horizonte, ni en todas las direcciones. Para hacerse una idea global de la resolución, se pueden representar las trayectorias conocidas como por ejemplo una cuadrícula (x, y) o viceversa de la rectificación de una cuadrícula (U, V).

5.5.2 Interpretación gráfica

Para analizar la estructura interna del contenido de la imagen puede ser necesario localizar y trazar isolíneas de intensidad. DigImage dispone del menú “Contours and edges” con distintas herramientas para elaborar mapas de curvas de nivel.

El primer paso es visualizar todos los contornos de una intensidad especificada, opción “Contours”. Para evitar pequeñas islas se especifica un número mínimo de píxels que ha de contener el contorno. De los contornos que interesen se puede:

- Guardar las posiciones en un fichero.DAT con la opción “Locate edge in window”. Si se quiere guardar algún punto de interés, como el centro del contorno, se puede hacer con la opción (P) “Points with additional data”. Además dispone de espacio para añadir a posteriori comentarios.
- Ajustar una curva al contorno por mínimos cuadrados con la opción (G) “Fit curve to contour”.
- También permite rellenar el contorno con una intensidad especificada, opción (F) “Fill to contour”. Repitiendo el proceso se puede obtener un mapa de curvas de nivel representado con franjas de color.

Por otro lado, se pueden representar gráficas de intensidad de distintas secciones. Se puede tratar de la fila y columna correspondientes a una posición especificada, opción (S) “Plot intensity sections”, o de una curva parametrizada por fórmulas de los ejes, en coordenadas reales o píxel, en función de la longitud de la curva opción (L) “Intensities along a line”. También incluye la posibilidad de representación tridimensional, opción (T) “Three-dimensional intensity plot”.

5.5.3 Series temporales

Una de las aplicaciones más potentes de DigImage es la obtención de series temporales de una línea o columna fija de la pantalla, opción (T)(L) “Time series of line and/or column”. De esta forma, se logra una representación en la que un eje corresponde al tiempo y el otro a la coordenada correspondiente a la fila o a la columna (figura 5.8).

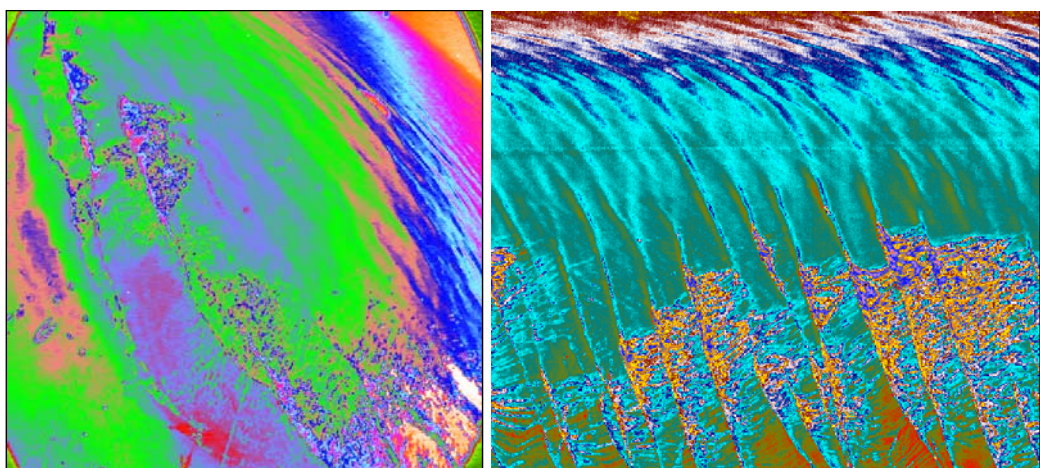


Figura 5-8. Serie temporal de una fila y 511 segundos.

En estas representaciones es posible cuantificar el período como un intervalo entre sucesos y la velocidad como una pendiente. Esto supone un gran avance, pues permite obtener datos indirectos en zonas de difícil medición, como la orilla de la playa. Se pueden calcular campos de velocidad reales realizando este proceso para cada fila o cada columna.

También permite cuantificar la evolución de las características geométricas de la imagen, como por ejemplo la evolución del tamaño de una mancha o de la zona de rompientes.

Además, se puede identificar la evolución del punto de rotura y cuantificar la fracción de olas rotas, pues al romper se produce espuma, efecto muy apreciable visualmente. Por otro lado, DigImage ofrece la posibilidad de seguir la evolución de uno o varios puntos y guardar los resultados en un fichero, opción (T)(P) "Time series at single point(s)". Análogamente, permite localizar y seguir la trayectoria del punto de intensidad media de una ventana seleccionada.

5.5.4 Promediado temporal

Puede resultar interesante realizar el promediado temporal de un intervalo de la filmación para determinar, por ejemplo, la línea de orilla o el ancho de la zona de rompientes, para trazar la pluma ficticia generada por un trazador o para promediar el efecto de la inclinación de la superficie por el oleaje. Este proceso, DigImage lo realiza automáticamente con todas las imágenes, o una ventana de éstas, de un intervalo de tiempo especificado, opción (T)(A) "Average of time series", o con una sucesión de algunas en determinados intervalos de tiempo, opción (T)(P) "Time series at single points", para casos en que el campo visual sea variable. En el caso de que se desee promediar una serie muy larga, se pueden hacer series parciales y después promediar los "buffers" correspondientes con (C)(A) "Average of buffers" si se hace la media aritmética y (C)(A) "RMS average of buffers" para la media cuadrática. En la figura 5.9 se muestra un ejemplo de la pluma ficticia resultante del promediado de una mancha.

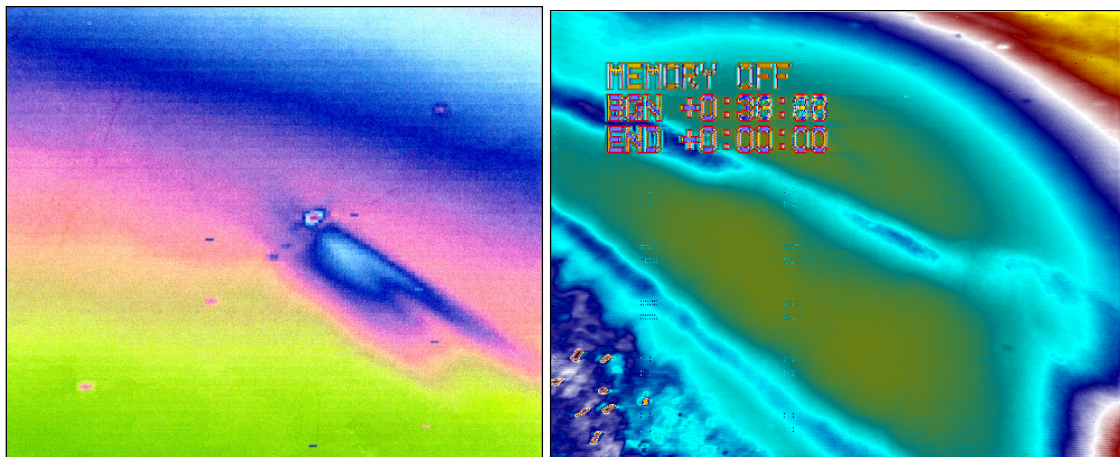


Figura 5-9. Imágenes de una mancha (izq) y de la zona de rotura (der) promediadas 5 minutos

5.5.5 Estadísticos

Dado que en el análisis de imágenes se trabaja con ficheros de datos muy grandes, necesariamente su estudio recurre a la estadística para su interpretación. Por ejemplo:

- Determinación del centro geométrico y del centro de gravedad de una celda definida por una isólinea de intensidad, mediante la opción (L)(B) “Blobs” para una sola imagen o con (L)(T) “Track centroids in array” para varias, y de forma directa con TICE y Kd, ya que éste es uno de sus resultados.
- Intensidad media por filas y/o columnas. La opción (L)(M) “Intensity means for lines/columns” realiza una media aritmética de las intensidades de los píxeles de cada fila y/o columna.
- Estadística de los segmentos que queden bajo y sobre un cierto umbral de intensidad. La opción (L)(L) “Line statistics” calcula la longitud de los segmentos horizontales y verticales que queden dentro y fuera, su media y desviación estándar.
- Longitudes características de una celda. Mediante la opción de DigImage (L)(N) “Integral mixing length scale” se puede determinar la longitud ponderada por la concentración, según los ejes de la ventana. Las longitudes absolutas longitudinal y transversal, se calculan con Kd.
- Varianza de dimensiones principales. El coeficiente de difusión se puede calcular como un medio de la derivada temporal de la varianza de la dimensión de la mancha en una dirección. DigImage dispone de la opción (L)(O) “Moments of intensity” para determinar los momentos de intensidad de las filas y/o columnas contenidas en una ventana, pero para determinar las varianzas en la dirección longitudinal y transversal de una mancha (en el caso de que no coincidan con los ejes de la imagen) es necesario recurrir a TICE.
- Correlación entre dos imágenes. La opción (L) “Cross correlation of two images” permite calcular la correlación cruzada entre dos imágenes en función de la posición del píxel. También se puede producir un gráfico de las

intensidades de cada píxel en ambas, los de una imagen en el eje horizontal y los de la otra en el vertical, con (L)(I) “Scatter plot of intensities for two images”. Después se puede evaluar la translación local necesaria para maximizar la semejanza entre ambas con (L)(S) “Shift to minimize differences” o con (L)(P) “Particle image velocimetry” si se quiere precisión a nivel de subpíxels. Haciendo el cociente entre translación e incremento temporal entre las imágenes se obtienen velocidades.

- Distribución de la concentración de una mancha. Para calcular dispersiones se asume que la distribución de la concentración es normal. Esta hipótesis hay que comprobarla mediante histogramas de intensidad “Intensity histogram” de una ventana que contenga la mancha. Esto también es útil para evaluar el rango y la escala de intensidades de cara a reajustes “Histogram equalisation” o para ver si hay saturación de algunos intervalos. Vease el ejemplo de histograma de la figura 5.10.

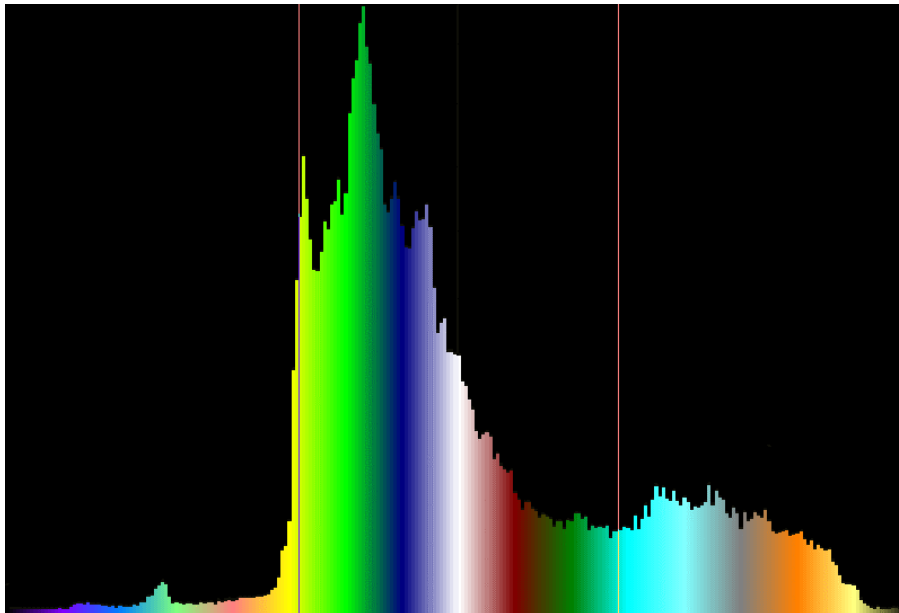


Figura 5-10. Histograma de intensidades

5.5.6 Análisis espectral

Es posible realizar un análisis espectral mediante series temporales de imágenes. Se ha comprobado, comparando espectros correspondientes a un sensor de altura de ola y a intensidades de una serie temporal, que hay una correspondencia entre los picos como se verá en el capítulo 7. Otra correlación es la que se puede adoptar entre la pendiente de la superficie de onda y la intensidad. Otro indicador de altura de ola es la variación en la línea de orilla, el runup+setup, parámetro identificable visualmente.

El análisis espectral es adecuado cuando las series tienen una longitud suficientemente grande respecto a la mínima frecuencia característica tratada y una resolución en el intervalo de muestreo, suficientemente pequeña frente a dicha frecuencia.

Para realizar un análisis espectral escalar de series temporales existen tres técnicas convencionales: Blackman-Tukey, Transformada rápida de Fourier (FFT) y el método

de máxima entropía (MME). Rodríguez y Jiménez (1994) demuestran que los parámetros obtenidos con los tres métodos no difieren mucho. El método más ampliamente usado, por su estabilidad y precisión, es el FFT. En cambio, para espectros direccionales no es tan simple el cálculo.

El método FFT emplea un periodograma de la densidad espectral $S_f(f_i)$ correspondiente a cada frecuencia f_i . Se define a éste como el cuadrado de la transformada de Fourier de la serie temporal y_t .

Hay diversos programas que permiten hacer un análisis espectral como: V-sas (LIM-UPC, Gómez, 1993), Statgrafics o Spectral (Aalborg University). La diferencia entre unos y otros es su flexibilidad de tratamiento en la serie temporal (e.g. ventanas o "tapering" de los datos), y tipo de salida. También es una de las opciones de DigImage (S) "Spatial FFT", que permite hacerlo en una dimensión con toda la resolución (opción 1), o 2D con una resolución de 256*128 (opción 2).

5.5.7 Análisis fractal

La capacidad de los satélites ERS-1/2 para monitorear un área grande permite revelar el cambio de la rugosidad de la superficie mar para detectar y clasificar los diferentes fenómenos hidrometeorológicos.

También es importante el factor de persistencia del trazador en el medio, ya que con el tiempo, y sobre todo a escalas más pequeñas, el campo de velocidades tiende a adveccionar y difundir de forma caótica al trazador (sea este petróleo de origen antropogénico o tensoactivos naturales asociados al plancton). Para manchas de petróleo de gran persistencia (días o semanas, lo que implica un accidente grave), su dimensión fractal tenderá a la del medio turbulento; sin embargo, para la mayoría de los vertidos intencionados su poca persistencia de horas o pocos días, hacen que su dimensión característica sea aproximadamente euclídea, $D = 1$.

Los vertidos de petróleo, así como otros procesos físicos y biológicos que producen cambios en las ondas capilares de la superficie del océano, son detectados debido a la disminución de la reflectividad de la superficie del océano, producida por cambios de la tensión superficial así como la disminución del oleaje debido a la formación de una microcapa tensoactiva.

Realizando un análisis fractal es posible conocer características de la tensión superficial del vertido y, por tanto, clasificar el tipo de sustancia, por ejemplo saber si se trata de un hidrocarburo o de una masa de plancton. Las manchas de petróleo o aceite, por su elevada tensión superficial y viscosidad, tienden a producir contornos suaves, de menor dimensión fractal $D_2 = 1,1-1,2$ que la asociada a la turbulencia $D_2 = 1.4$. Otro parámetro importante es la distribución de la dimensión fractal (multifractal) para los diversos niveles de intensidad de las imágenes SAR, (Ver Gade y Redondo, 1999).

El análisis fractal hace una autocorrelación de la longitud de cada contorno de intensidad para distintos tamaños de la escala o patrón de medida. Si a medida que el patrón de longitud usado disminuye, se detectan nuevas convoluciones, la longitud total diverge. Estas convoluciones autosimilares pueden medirse de forma geométrica mediante una dimensión fractal (medida por el método del box-counting,

recubrimientos o celdas ocupadas para distintas particiones de distintos tamaños), que puede calcularse como.

$$D_2 = \frac{\ln N(\sigma)}{\ln \sigma}$$

Ec. 5-44

siendo $N(\sigma)$ número de recubrimientos y σ el número de particiones de tamaño L_0/σ . Se considera D_2 , ya que la posible curva fractal dada por un nivel determinado de la intensidad reflejada de la imagen SAR sólo puede alcanzar el valor $D=2$.

6 EXPERIMENTOS

Para realizar esta tesis ha sido necesaria la obtención de imágenes de vídeo como base de estudio para analizar distintos parámetros hidrodinámicos. Los experimentos se realizaron en diversas campañas de medición con diferentes escenarios hidrodinámicos y con distintos mecanismos de captación de imágenes.

Uno de los principales problemas a la hora de gestionar adecuadamente la zona costera es contar con herramientas y datos suficientes para que los gestores y técnicos puedan tomar decisiones. Pero lograrlas no siempre es fácil debido a sus altos costos y a su difícil aplicación e interpretación. Surge, por tanto, la necesidad de buscar métodos alternativos para conseguir esta información, como los sistemas de vídeo.

Por medio de una imagen de un tramo de costa, se identifican puntos y zonas de interés: línea de costa, vegetación dunar, playa húmeda, parámetros del oleaje, zonas de rotura, etc. Además, si esta imagen se toma de forma continua, se genera una base de datos lo suficientemente larga como para cuantificar y evaluar de forma precisa los cambios que se producen en la costa.

6.1 INTRODUCCIÓN

Este trabajo está basado en experimentos de campo. Para la realización de técnicas experimentales es necesario el despliegue de unos medios materiales y la formación de un equipo interdisciplinar.

Los coeficientes de difusión obtenidos en los experimentos presentan una gran variedad, condicionada a la variación de los parámetros ambientales intrínsecos a la zona y muestran una dependencia característica con la escala temporal y espacial de los fenómenos predominantes. Así pues, la distribución de una sustancia depende de la interacción de múltiples escalas, por lo que el estudio en distintos escenarios permite un análisis mucho más amplio: zona de rompientes en la barra del Trabucador, mezcla de flujos en la cuña salina del Delta del Ebro, aguas confinadas en el puerto de Barcelona, mar abierto en el Mediterráneo Occidental.

Los experimentos observan la dispersión a pequeña escala, mediante trazadores puntuales o lagrangianos (boyas) y trazadores continuos (manchas), en la superficie del agua y a escalas mayores se observan manchas de crudo a través de imágenes de satélite.

Las medidas directas de los coeficientes de dispersión se correlacionan con suficiente detalle con medidas simultáneas de viento, oleaje, corriente interna, corriente de marea, temperatura del aire y del agua, morfología del fondo marino etc., con el objetivo de encontrar la dependencia funcional de la interacción de cada parámetro relevante del medio ambiente marino y la geometría de la zona con el coeficiente de difusión medido, pues se producen diferencias importantes.

Se toman datos de alta calidad, con una resolución tridimensional, a distintas escalas (macroturbulencia, olas de viento, olas largas y corrientes), con un instrumental específico para cada medida, de forma integrada para que los resultados estén sincronizados. Para ello es necesario diseñar un sistema combinando equipos y compatibilizando sus características específicas.

Con estos datos se calibran los modelos numéricos desarrollados, de propagación de oleaje irregular, de circulación Q-3D, de contaminación, etc. Así se obtiene un análisis completo y armónico de los procesos hidrodinámicos que permite cuantificar la influencia de cada parámetro en un proceso.

6.2 METODOLOGÍA DE LOS EXPERIMENTOS

La metodología incluye una parte de campo y otra de laboratorio. La primera corresponde principalmente a los medios logísticos de adquisición de imágenes y la segunda al instrumental de digitalización y proceso de imágenes.

Los principales aspectos a tener en cuenta son: tipo de experimento, objetivos, mecanismo de elevación, campo visual, puntos fiduciales, sincronización, trazadores, métodos de seguimiento y postproceso.

TIPO DE EXPERIMENTO:

Los experimentos pueden ser de campo o de laboratorio.

En el campo hay muchos inconvenientes o dificultades técnicas que dificultan la medición:

- Hay muchos parámetros variables (atmosféricos, estado del mar, etc.).
- Se pueden producir muchos fenómenos simultáneamente y puede no darse el que se desee medir.
- El mantenimiento y almacenamiento del material se hace de forma provisional.
- Es necesario prevenir cualquier contratiempo y disponer de repuestos y alternativas, pues la ley de Murphy se cumple frecuentemente.

Los experimentos hidrodinámicos, además de ser costosos, requieren un esfuerzo logístico importante tanto antes como durante y después de la medición. Por ello es importante:

- Verificar y calibrar los instrumentos en las condiciones lo más parecidas posibles al experimento.
- Hacer una planificación y organización exhaustiva del material, instrumentos y personal necesario para optimizar la eficacia del trabajo.
- No dejar nada a la improvisación: disponer de material de repuesto, adoptar hipótesis de actuación en situaciones extremas, estimar la duración de cada unidad y conocer los márgenes de maniobra, etc.
- Establecer una metodología para sincronizar los equipos.
- Adoptar una nomenclatura disciplinada y rigurosa de todos los datos y resultados, además de documentarlos con las observaciones oportunas.

En cambio, en laboratorio se trabaja con menor aleatoriedad.

OBJETIVOS DEL EXPERIMENTO.

Según la información que se desee obtener se desarrollará una metodología específica tanto para la medición como para el proceso de los datos. La técnica del análisis digital de imágenes puede ser aplicada a distintas ramas del campo de la ingeniería marítima, como por ejemplo a morfodinámica, topobatimetrías, campo de velocidades, campo de olas, evolución de contornos (superficie libre, línea de orilla, fondo, interfases, etc.), dispersión de trazadores, mezcla de masas de agua, trayectoria de objetos (buques, trazadores, partículas de sedimento, bloques, etc.).

MECANISMOS DE ELEVACIÓN.

Para registrar los experimentos hay que elevar la cámara a un lugar que permita obtener una visión del dominio de actuación. Cuanto más cenital y alta esté situada la cámara, mejor calidad de imagen se obtendrá. En laboratorio es fácil conseguirlo, pero en campo, hay que recurrir a medios auxiliares como farolas, grúas, mástiles de barco, globos, etc.

CAMPO VISUAL.

Para registrar un experimento conviene previamente determinar el campo visual de la imagen y ajustar la posición y orientación de la cámara, de modo que el dominio de los experimentos esté incluido en éste y que se vea con una resolución adecuada (por ejemplo que los puntos fiduciales se puedan distinguir, es decir, que ocupen al menos

un píxel). Además, hay que cuidar detalles como: tener una iluminación adecuada para que haya un buen contraste o eliminar sombras y reflejos.

PUNTOS FIDUCIALES PARA TRANSFORMACIÓN DE COORDENADAS.

Debido a las distorsiones de la lente gran angular y la inclinación de la cámara, es necesario hacer una transformación de coordenadas entre los píxeles de la pantalla y los puntos reales. Para ello se deben conocer las posiciones de un número mínimo de puntos fiduciales, marcados de forma que se puedan distinguir en la imagen, con los que se ajustan los coeficientes de la función de transformación.

SINCRONIZACIÓN TEMPORAL CON OTRAS VARIABLES HIDRODINÁMICAS.

Es deseable que si se toman medidas de otros parámetros adicionales se haga de forma sincronizada, pues aportan información adicional que permite estudiar la influencia de dichos parámetros en el proceso.

SELECCIÓN DEL TRAZADOR MÁS ADECUADO.

Para obtener parámetros hidrodinámicos mediante el análisis de imágenes es necesario que haya evidencias visuales suyas. Si no se visualizan de forma natural se puede conseguir artificialmente, vertiendo un trazador.

En el caso de dispersión de contaminantes es necesario seleccionar una sustancia que: sea persistente, de un buen contraste, no se altere con la presión, temperatura o salinidad, no sea nociva para la flora o la fauna y si es posible que no sea muy cara. Por ejemplo: Rodamina B, Fluoresceína sódica, Permanganato potásico, Cal o Leche.

En el caso de seguimiento por partículas, conviene que sean de un tamaño suficientemente grande para que ocupen al menos un píxel y de un color que de un buen contraste. Para atenuar el efecto del viento conviene darles cierto peso, de modo que no sean arrastradas con tanta facilidad.

MÉTODOS LAGRANGIANOS Y EULERIANOS

Para tomar las medidas hay dos tipologías, por un lado los aparatos con sensores dan medidas eulerianas, es decir fijas respecto al medio, y por otro lado los métodos lagrangianos, es decir en movimiento con el medio, que miden los parámetros relativos entre partículas. Así, las medidas de los sensores se consideran eulerianas, mientras que las de los trazadores son lagrangianas.

POSTPROCESO

El equipo de digitalización es controlado por un "software" a través de una interfase controladora. En este caso se empleó el desarrollado por el CERC, Cambridge, RU, denominado DigImage. Este programa permite obtener imágenes digitalizadas con una resolución espacial de 512x 512 píxeles y temporal de 25 Hz, con una variación en la intensidad de 0 a 255. Además dispone de numerosas aplicaciones, pero para algunos tratamientos específicos fue necesario desarrollar programas complementarios:

- TICE del LIM / UPC, Barcelona.
- Kd elaborado expresamente para este trabajo.
- Digiflow

6.3 CAMPAÑAS DE CAMPO

6.3.1 Campaña Delta 93

El Laboratorio de Ingeniería Marítima (L.I.M.-U.P.C.) estudió en profundidad la hidromorfodinámica de la zona costera del Delta del Ebro con distintas campañas de campo durante varios años y gran cantidad de datos para caracterizar la zona de rompientes e identificar y medir sus principales procesos: la estructura del flujo oscilatorio, el transporte de sedimentos y la dispersión de contaminantes.

En estos experimentos y en el postproceso de los datos obtenidos han colaborado distintas instituciones y los mismos han sido financiados por distintos proyectos:

- Proyecto de Hidrodinámica en Zona de Rompientes. Fase II, DGICYT del Ministerio de Educación y Ciencia. Está centrado en la Zona de Rompientes de un transecto de la Barra del Trabucador del Delta del Ebro.

- Proyecto FANS (Flow Across Narrow Shelves: The Ebro Delta Case) del programa MAST de la UE. Es mucho más ambicioso cubriendo un área de aproximadamente 75 x 50 Km² (desde el sur de Cabo Salou hasta las islas Columbretes). El estudio está separado en distintos subdominios:

- Zona de Rompientes (Surf Zone): de 0-3 m de profundidad.
- Zona costera (Nearshore): de 3-15/20 m.
- Zona de influencia del río.
- Zona de plataforma (Shelf), no tratada en esta presentación.

- Proyecto "La calidad de las aguas costeras. Investigación numérico-experimental de flujos hidro-bio-geoquímicos", Programa CYTMAR del CICYT (Ministerio de Educación y Ciencia).

De todos los parámetros posibles se seleccionaron los más importantes, de manera que se dispusiese de un conjunto completo de los principales procesos físicos:

- Oleaje incidente: dirección, períodos, alturas, espectros, grupos de olas.
- Niveles de superficie libre y su variación en distintas escalas temporales (viento, ondas largas y nivel medio).
- Campo vertical de velocidades en distintas escalas temporales.
- Campo horizontal de velocidades y sus variaciones en escalas temporales.
- Difusión turbulenta horizontal.
- Batimetría y sus cambios por efecto del transporte de sedimentos.
- Características morfodinámicas de la zona de estudio: presencia de barras, línea de rotura, formas rítmicas en la orilla y zona de "swash".
- Características granulométricas y de concentraciones en suspensión.
- Condiciones meteorológicas.

Con el análisis de imágenes se identifican directamente distintos aspectos como:

- Advección y dispersión de trazadores para estimar la difusión turbulenta longitudinal y transversal.
- Fracción de oleaje que rompe progresivamente a lo ancho de la zona de rompientes.
- Frecuencias dominantes del oleaje.
- Ondas de borde y batimetría rítmica.
- Barras sumergidas.
- Corrientes longitudinales y de retorno.

En campañas previas, dentro del marco de los proyectos de investigación financiados por la DGICYT, el MOPTMA y el programa MAST de la UE, se probó y desarrolló la metodología necesaria para el análisis de la dispersión de trazadores.

Para la elección del lugar de la campaña de medidas se tuvieron en cuenta numerosas posibilidades. Se seleccionaron cuatro playas: El Faro, La Marquesa, Los Eucaliptos y la Barra del Trabucador. Y finalmente se escogió esta última por los siguientes motivos:

- Cuasi-uniformidad longitudinal.
- Baja influencia de mareas.
- Accesibilidad y proximidad a Barcelona (LIM/UPC).
- Disponibilidad de información batimétrica, sedimentológica, de oleaje, etc.
- Importancia local y regional del lugar.

La Barra del Trabucador es parte de la flecha sur del Delta del Ebro, la cual suele ser sobrepasada por tempestades y presenta frecuentemente un perfil multibarrado y condiciones de uniformidad longitudinal. (Ver figura 6.1).

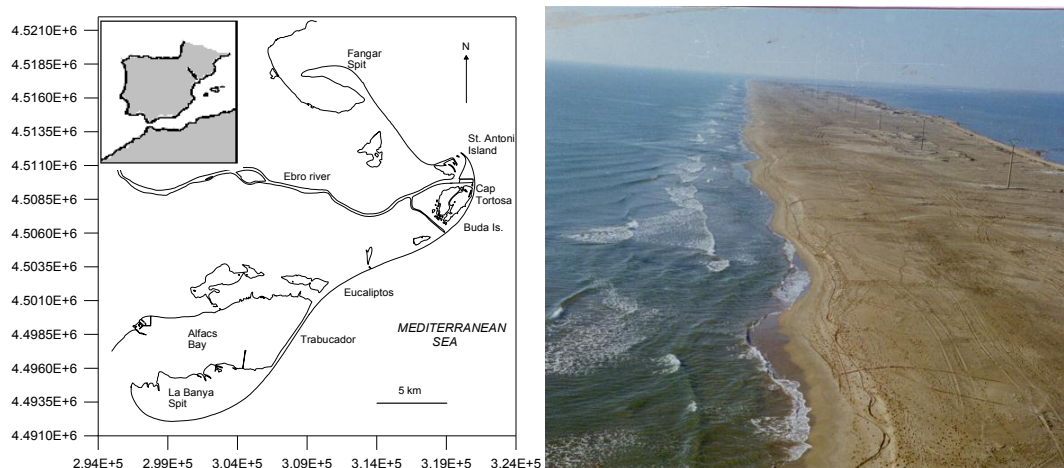


Figura 6-1. Situación y foto de la Barra del Trabucador en el Delta del Ebro

Selección del trazador óptimo para la dispersión. Se probó verter distintas sustancias o tintes. Se descartaron la Rodamina y el Permanganato de Potasio por su escaso contraste en el mar y por tanto difícil identificación en la grabación de vídeo. En cambio, se escogieron la Fluoresceína Sódica, por su alta persistencia, y la Leche, por su excelente contraste. La mezcla de leche con fluoresceína combinaba ambas ventajas. Para obtener una buena imagen y seguimiento de la mancha se ajustaron los volúmenes de colorante, se determinó que el instante de vertido debía coincidir con el seno de la ola, de esta forma se minimiza la perturbación de la espuma de la rotura. Estos trazadores se comportaron como buenos indicadores lagrangianos del flujo medio, no sólo superficial, ya que se movieron “solidariamente” a las boyas lastradas, la mayor parte de su recorrido.

Para el estudio de la advección se usaron boyas. En las pruebas sólo fueron visibles las de 30 cm de diámetro y de color amarillo. Las que dieron mejor comportamiento fueron las agrupadas en grupos de tres. Por otro lado, se observó que eran arrastradas por viento, por lo que para minimizar este efecto se decidió lastrarlas. Inicialmente se probó con probetas de hormigón, pero se descartó por las dificultades

logísticas que implicaba su uso (pesaban mucho y se necesitaba mucha gente para verterlas y recogerlas). Finalmente se dejó como lastre una cadena de acero de 20 cm. Esto supuso que cerca de la orilla rozaban el suelo y quedaban atrapadas. Las boyas terminaron finalmente en la línea de orilla, mientras que las manchas fueron advectadas paralelas a la costa hasta dispersarse totalmente.

Determinación de puntos fiduciales. Se confeccionaron banderas blancas de 0,5x0,5 m² con un asta de 1 m de altura, para posicionar puntos en la línea de orilla. También se consideraron las boyas de referencia ancladas en el mar y las posiciones del trineo.

Evaluación del medio de elevación y soporte de la cámara de vídeo. Las imágenes fueron tomadas desde el brazo extensible de una grúa en la playa. Se contrató una de triple tracción de 16 Tn y 20 m de longitud de brazo. La posición de la cámara se fijó de la forma más cenital posible y se graduó la orientación y altura para optimizar el campo de visión en las imágenes de vídeo en función de la lente utilizada (gran angular de 105°H y 88°V).

Sincronización y nomenclatura de los experimentos. Para cada experimento se anotaba el número de test, tiempo de cinta de vídeo y hora GMT. De esta manera se puede identificar cualquier imagen con el tiempo en que se tomó. El nombre de los tests de las distintas medidas tenían una raíz numérica común, cuyos dos primeros dígitos correspondían al día y los dos segundos al ordinal de test de trineo realizado durante ese día. En el caso del vídeo se añadía una letra para cada trazador vertido.

Del 11 al 17 de diciembre se midieron cinco estados de mar (12 tests) que cubrieron casos sin viento (el caso II 15 Diciembre), desde oleaje débil a oleaje de media energía coexistente con intensas corrientes (≈ 1 m/s) (caso IV 16 Diciembre) (ver Rodríguez et al., 1995).

6.3.2 Campaña Delta 96

En Noviembre de 1996 se reanudaron los experimentos (Delta'96). Se contó con la colaboración con otros institutos de investigación nacionales (Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX) e internacionales (Instituto Oceanográfico Gelendzhik y el Instituto Oceanográfico Shirshov de la Academia de Ciencias de Rusia) para la adquisición de medidas hidromorfodinámicas, (Sánchez-Arcilla 1997 a y b).

La zona de trabajo coincidió con la de la campaña Delta'93, la Barra del Trabucador del Delta del Ebro, en la zona de rompientes. Tuvo lugar del 30 de octubre al 10 de Noviembre de 1996. Las condiciones ambientales, medidas en 45 tests, fueron con presencia de vientos medios intensos (10-15 m/s) y oleaje débil a medio según el test ($H_s < 75$ cm).

La campaña se organizó por grupos de trabajo: topografía, trampas de sedimentos trineo y vídeo cada uno de los cuales se encargaba de un tipo de medidas. En la figura 6.2 se muestran los días de medida de cada grupo.

Tarea		Días:											
		30/10	31/10	1/11	2/11	3/11	4/11	5/11	6/11	7/11	8/11	9/11	10/11
Topografía	Inicial	■	■										
	Apoyo			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Final										■	■	■
Video	Globo (Video Color)				■	■							
	Grúa (Video B&N)			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Grúa (Video Color)											■	
Trineo	Estación Meteorológica				■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Olas y Corrientes				■	■	■						
	Sedimentos				■	■	■		■		■	■	■
Trampas	PST												
Sedimento	Trampas Fijas				■							■	
Playa	Estación Meteorológica	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Tetrapodo	EMC + SP												■

Figura 6-2. Cronograma de las medidas de la campaña Delta'96

El equipo de topografía midió la morfología de la playa y de la batimetría, tanto inicialmente como durante la campaña y al finalizar ésta, para ver la evolución de la morfología de la zona. Por ello fue el primero en actuar.

Previamente se había encargado la instalación de tres vértices mediante GPS con coordenadas UTM respecto al geovértice catalán y ortocota respecto el nivel medio del mar en Alicante. Estos vértices estaban instalados detrás de la duna que todavía queda en la Barra del Trabucador para mayor seguridad. Para establecer visuales con la playa fue necesario situar dos vértices auxiliares sobre la duna. Estos puntos fueron tomados con el método de medidas directas e inversas de Bessel para cometer menos errores. A partir de ellos se establecieron 10 bases alineadas paralelamente a la línea de orilla. Las cinco centrales estaban separadas unos 20 m y las laterales 50 m. Desde cada base, por radiación, se trazó un perfil transversal a la playa hasta la zona sumergida que podía ser cubierta a pie. Debido a la hidrodinámica de la zona, había dos barras de arena, ligeramente oblicuas a la línea de orilla, cuya batimetría podía hacerse a pie. El resto, la zona entre las barras, se hizo desde una embarcación neumática tipo Zódiac, posicionando desde tierra y midiendo la profundidad con un escandallo.

Posteriormente, el equipo de topografía también se encargó de posicionar los distintos ensayos y los puntos fiduciales necesarios en la transformación de coordenadas de las imágenes de vídeo.

El equipo de sedimentos se encargó de cuantificar el transporte de sedimentos poniendo trampas, fijas y móviles. Éstas consistían en unas bolsas alargadas de una tela sintética porosa (equivalente a 200 micras) que permiten el paso del agua pero no

del sedimento (fracción arena). Las bolsas se colocaban en una estructura metálica a distintas profundidades y se las mantenía en el agua un determinado tiempo en función del transporte longitudinal en suspensión. Después se sacaban y se guardaba el contenido para su posterior análisis en laboratorio.

EQUIPO HIDRODINÁMICO DE LA ZONA DE COSTA

En la zona de costa se dispuso un **tetrápodo** (figura 6.3) fondeado a 3,5 m de profundidad y aproximadamente a 150 m de la línea de orilla. Se midieron olas, nivel del agua (η) y velocidades horizontales mediante un conjunto de sensor de presión (SP) y un correntímetro electromagnético biaxial para corrientes en el plano horizontal (Interocean S4) situado a 1,5 m del fondo.



Figura 6-3 Tetrápodo-Instrumental con S4DW correntímetros y sensor de presión.

El oleaje se midió a una frecuencia de 4 Hz en registros continuos de 35 minutos cada hora. Las mareas y corrientes se obtuvieron promediando registros de 2 minutos cada media hora. Los datos de presión y velocidades fueron guardados en la memoria interna del aparato como archivos de vectores promediados en 2 minutos que permiten la obtención de niveles y corrientes medidas.

Se dispuso también de medidas de oleaje direccional en alta mar en registro continuo con una boya direccional Datawell Waverider y medidas de oleaje, corrientes y sedimentos en suspensión con 2 trípodes fijos con 3 correntímetros electromagnéticos esféricos 2D Delf P-S (CEM), 3 "Optical Back-Scatter" (OBS), 1 sensor de presión cada uno, además de baterías y un "Data logger" (Campbell-CR10) fondeados a una profundidad aproximada de 10 a 20 m. El período de medición fue de 1 mes aproximadamente

EQUIPO HIDRODINÁMICO DE LA ZONA DE ROMPIENTES

Dentro de la Zona de Rompientes se dispuso un en un **trineo**(figura 6.4), una estructura metálica de acero inoxidable marino, no magnético, de unos 2,5 m de alto, 2,5 m de largo y 1,8 m de ancho, que servía de soporte para los aparatos de medida. 6 correntímetros electromagnéticos, 1 sensor de oleaje, 3 Backscatters ópticos, 1 Brújula y 1 prisma óptico y se podía desplazar mediante trácteles desde la costa.



Figura 6-4. Trineo Instrumental.

Se midieron olas, niveles, y velocidades con sensores situados con una distribución helicoidal en la vertical: 6 correntímetros electromagnéticos Delft e.m.s.-P 2D con una frecuencia de muestreo de 20 Hz dispuestos a 10, 20, 30, 40, 60 y 80 cm del fondo. También se tomaron medidas de sedimentos en suspensión mediante turbidímetros ópticos OBS (Optical Back-Scatter) (Shirshov) a una frecuencia de 20 Hz durante 30 minutos, dispuestos a 0,05, 0,25 y 1 m del fondo para medir las componentes horizontales. Esta disposición permitió conocer la estructura 3D y la capa límite del fondo, en 45 posiciones calibrados con 1 brújula digital Aanderaa con un error menor a 0,3 grados. Los niveles de agua se midieron mediante un sensor de contacto WG (Etrometa) apto para la Zona de Rompientes a frecuencia de 4 Hz.

Equipos	Distancia costa	Prof (m)	Sensores	Frec.Muestreo.
NS-Tripodes 1-2	1500-3000 m	8,5 – 12,5	3CEM,3OBS,1 SP	2 Hz, 20'/3Hr
SZ-Trineo	150 m	3.5	1 CEM, 1 s.pres.	2-4Hz, 20'-40'
Boyas DWR 1 2	1500-aprox10Km	8 – 50	3D acelerómetros	1.78 Hz, 20'/3Hs
Tramp. Sed.	De 50 a 200 m	de 1 a 3	recip.de captura	1-2 días
Vídeo IMG	de 0 a aprox.300	de 0 a 3-4	BN-color	50 Hz, 30'

Tabla 6.1. Situación del Instrumental empleado

Todos los datos se almacenaban en 1 datalogger CR10 de 14 canales en un contenedor estanco para recibir conjuntamente los datos de los correntímetros y la señal del sensor de altura de ola para asegurar la sincronización de las medidas. La frecuencia de muestreo de los correntímetros fue de 20 Hz y la del sensor de altura de ola de 4 Hz, permitiendo estudiar el flujo oscilatorio y la macroturbulencia producida por la rotura del oleaje. La duración de las series temporales osciló entre 20 y 40 minutos. En la tabla 6.1 se indican los aparatos desplegados durante la campaña y alguna de sus características.

El equipo de vídeo se encargaba del registro de imágenes de trazadores que se echaban en la zona de rompientes simultáneamente a los test de trineo. El equipo de vídeo constaba de una cámara en blanco y negro fijada en el extremo de la pluma de una grúa de 40 m y de otra en color suspendida de un globo de PVC hinchado con Helio sobre la zona de vertido. Como el globo se inutilizó al tercer día de campaña, se subió la otra cámara a la grúa pues se había previsto que podía haber problemas con el globo y se preparó el soporte de las cámaras para que pudiesen ir dos cajas estancas (véase la figura 6.5).



Figura 6-5. Extremo de la grúa con las dos cámaras.

Las imágenes se transmitían por cable hasta dos magnetoscopios S-VHS donde eran grabadas simultáneamente. Para visualizarlas se disponía de una única pantalla con un desviador de la señal que permitía elegir imágenes. Adicionalmente, se filmó mediante una cámara portátil desde la cesta de la grúa de 40 m.

Inicialmente se hicieron pruebas para que el posicionamiento de las cámaras permitiera un buen campo de visión. Finalmente se adoptó una posición oblicua que dejaba la zona de rompientes en la diagonal. Después se prepararon manchas con distintos trazadores (leche, agua con fluoresceína, leche con fluoresceína) para ver cual proporcionaba un óptimo contraste. El más usado fue la combinación de 6 litros de leche y dos cucharadas de fluoresceína sódica, pero también se vertieron manchas de leche sola y de fluoresceína (figura 6.6). A continuación se resumen los test realizados.



Figura 6-6. Mancha de leche cerca del trineo.

Día / Test	Trazador	Hora Gmt	Tiempo B/N	Cinta	Tiempo Cinta Color
01 00 A	boyas	16:50		b0	
01 00 B	6 leche		0:06:30	b0	
01 00 C	6 leche		0:17:57	b0	
02 01 A	boyas	13:12	0:57:33	b0	
02 01 B	boyas	14:50	1:13:31	b0	
02 02 A	6 leche	15:10	0:06:30	b1	
02 02 B	6 leche	15:21	0:17:57	b1	
02 03 A	6 leche	16:14	0:57:23	b1	
02 03 B	6 leche	16:14	0:57:33	b1	
03 01 A	6 leche	9:30	1:04:30	b1	
03 01 B	6 agua+ 2fl	9:31	1:06:30	b1	
03 01 C	6L2F	9:34	1:07:40	b1	
03 02 A	boyas	12:12	1:14:50	b1 c1	0:47:10
03 02 B	boyas	12:24	1:29:00	b1 c1	1:01:00
03 02 C	6L2F	12:34	1:34:22	b1 c1	1:06:45
03 03 A	6 leche	14:56	2:25:40	b1 c1	1:58:03
03 03 B	6 leche	15:14	2:43:40	b1 c1	2:16:43
03 03 C	6 leche	15:35	3:04:12	b1 c1	2:36:25
04 03 A	6 leche	11:14	0:11:53	b2 c2	
04 03 B	6 agua+2fl	11:15	0:12:48	b2 c2	
04 03 C	6L2F	11:18	0:15:55	b2 c2	
04 04 A	6L2F	11:55	0:51:40	b2 c2	
04 05 A	6L2F+boyas	12:17	1:14:28	b2 c2	
04 06 A	6L2F+boyas	12:53	1:51:00	b2 c2	
04 07 A	6L2F+boyas	16:06	0:01:03	b3 c3	
04 07 B	6L2F+boyas	16:06	0:01:08	b3 c3	
05 00 A	6L2F+boyas	9:43	0:21:40	b3 c3	
05 01 A	6L2F+boyas	10:58	1:19:00	b3 c3	
05 02 A	(6L2F)*2	11:58	1:45:46	b3 c3	
05 03 A	6L2F	12:36	2:11:10	b3 c3	
05 04 A	6L2F	13:14	2:36:40	b3 c3	
05 05 A	6L2F	16:42	0:16:35	b4 c4	
06 01 A	6L2F+boyas	9:57	0:44:00	b4 c4	
06 01 B	(8L3F)*2	11:06	1:05:00	b4 c4	
06 01 C	boyas	11:13	1:12:00	b4 c4	
06 02 A	6L2F	13:36	1:44:30	b4 c4	
06 02 B	2boyas	13:49	1:45:12	b4 c4	
06 03 A	6L2F+2boyas	14:58	2:06:00	b4 c4	
06 04 A	6L2F	15:35	0:03:00	b5 c5	

Día / Test	Trazador	Hora Gmt	Tiempo B/N	Cinta	Tiempo Cinta Color
07 02 A	(6L2F)*2	9:52	0:15:00	b5 c5	
07 08 A	(6L2F+9b)*2	16:11	0:32:00	b5 c5	
08 07 A	6L2F	14:31	2:09:00	b5 c5	
08 07 B	6L2F	14:39	2:17:05	b5 c5	
08 07 C	6L2F+2boyas	15:56	2:33:35	b5 c5	

Tabla 6.2 Experimentos de Delta 96

6.3.3 Desembocadura del Ebro

Esta campaña se planteó como un trabajo multidisciplinar para estudiar el estuario de la desembocadura del río Ebro. Se trata de una zona de especial interés pues se tiene lugar un choque entre dos flujos de agua con características muy distintas. Por un lado se produce una intrusión en profundidad de agua marina que remonta río arriba en forma de cuña, y por otro lado el agua dulce del río se descarga al mar extendiéndose superficialmente como una capa fina flotante en forma de pluma (figura 6.9) (Rodríguez et al 1997 c).



Figura 6-7. Interfase de la pluma de agua dulce en el mar.

Se tomaron medidas tanto hidrodinámicas como bioquímicas para caracterizar el estuario y el medio estuarino y costero-fluvial. El área de estudio era muy amplia y presentaba muchas dificultades para su medición, de forma que se fue necesario un gran despliegue de medios, distintos tipos de embarcaciones e instrumentos de medida, y de personal de distintas instituciones. El trabajo se repartió por temas de la siguiente forma:

- L.I.M – U.P.C. (Laboratorio de Ingeniería Marítima de la Universidad Politécnica de Cataluña). Se encargó de la preparación y organización de la campaña, además de la medición de los parámetros físicos. En particular realizaron:

- El fondeo de un tetrápodo que servía de estructura de sustento de un C.T.D (Conductivity, Temperature & Depth) y un correntímetro electromagnético

direccional (S4DW) con sensor de presión. La adquisición de datos se hizo de forma continua en un punto de la interfase, a unos 10 m de calado, delante de la desembocadura.

- Toma de los datos necesarios para el modelado numérico de la intrusión de la cuña salina y su evolución con la marea. Para ello primero se midió la batimetría de una sección de control del río y después se trazó una poligonal de unos 2 km con puntos a lo largo de la orilla desde los que se medía la altura de la lámina de agua en las distintas etapas de la marea. Previamente se había hecho una predicción de la marea cogiendo los cinco armónicos principales y ajustando la amplitud con los registros de una boya en L'Ametlla y la fase con las medidas que se hicieron en la barra del Trabucador en Noviembre. También se llevó a cabo la toma de muestras de sedimentos con una draga para ver la evolución de la granulometría en el frente de la cuña salina.
- Por otro lado, se tiraron manchas de trazadores y se grabaron en vídeo desde lo alto del mástil del velero "Barcelona" para realizar un análisis digital de la dispersión de éstas.

- U.P.V. (Universidad Politécnica de Valencia). Se encargaron del análisis de nutrientes del agua, tanto en la superficie como a distintas profundidades, con especial interés en la interficie salobre. Para detectar la cuña salina emplearon un CTD. Tomaron muestras de agua, mediante una bomba de succión, que se guardaron en botellas especialmente acondicionadas para cada tipo de análisis, y se conservaban en neveras hasta su llegada al laboratorio. Allí se determinaron: los nitritos, nitratos, fósforo, silicatos, sólidos en suspensión, clorofilas, células totales, potencial Redox y en algunos casos la salinidad. También se tomaron medidas de velocidad mediante un molinete.

- U.B. (Departament d'Ecologia de la Universitat de Barcelona), con el barco "Caribdis", una lancha motora equipada para hacer perfiles continuos de C.T.D. y botellas "Niskin", de un metro de altura, para tomar muestras de agua a distintas profundidades y medir la productividad primaria y el consumo de oxígeno.

- Facultad de Náutica de la U.P.C. que contribuyó a la campaña con "el Barcelona" un velero de 12 m de eslora, "la Pachanga" una barcaza, una lancha neumática y la tripulación necesaria para su navegación.

- El "Tethys" (buque oceanográfico francés), que era el encargado de medir en la zona costera, pero por problemas burocráticos no se les concedió el permiso necesario.

- Centre d'Estudis Avançats de Blanes, se dedicaron a estudiar la poblaciones de fitoplancton y otros parámetros biológicos.

6.3.4 Puerto de Barcelona

Como complemento al proyecto de ampliación de las obras del puerto de Barcelona redactado por Alatec-Haskoning se iniciaron una serie de experimentos para medir la dispersión en las diferentes zonas del puerto de Barcelona. Después la Autoridad Portuaria mostró su interés en continuar con los mismos para analizar su variabilidad estacional así como su entorno. Los experimentos, resultados y análisis de los mismos, están ampliamente detallados en el informe realizado para la Autoridad Portuaria. "Difusión Turbulenta y Transporte de Contaminantes en la Zona del Puerto de Barcelona: Estudio integrado de visualización mediante satélites, observación

remota local y medidas in situ” (2000-2001). Aquí se presenta un resumen de los mismos.

SITUACIÓN

Se tomaron imágenes de los experimentos desde 23 emplazamientos. Se empezó por la bocana y se recorrieron los principales muelles. En la figura 6.10 se indica la situación de los experimentos.



Figura 6-8 Mapa de las medidas en el puerto de Barcelona

1. Bocana Aguas afuera
2. Bocana Prolongación del dique
3. Bocana Aguas adentro
4. Bocana Contradique
5. Nuevo contradique
6. Muelle Alvarez de la Campa
7. Muelle de Lepanto
8. Inflamables
9. Dársena Sur
10. Dársena Interior
11. Estibadora de Ponent
12. Pantalan de Petroleros
13. Canal de acceso
14. TCB
15. Ergransa
16. Dársena de Morrot
17. Puente – Muelle de Poniente
18. Puente – Muelle Occidental
19. WTC – Dársena de Sant Bertran
20. WTC – Muelle Cataluña
21. WTC – Maremagnum
22. Portal de la Pau – Maremagnum
23. Muelle del Reloj – Aquarium

La bocana del puerto es una zona especial por su intenso tráfico marítimo y condiciones de agitación. Su estudio se realizó de forma sectorial en abanico desde aguas afuera hasta el interior, de más agitadas a más abrigadas.

La ubicación de las cámaras está en una zona despejada, por lo que se puede orientarla en todas las direcciones, de forma que permite abarcar desde el mismo emplazamiento todos los sectores de estudio.

La cámara portátil se colocó en el final del Dique del Este, unas veces en el espaldón y otras en la baliza verde que señala la entrada por la bocana (figura 6.11). En la parte más elevada de la baliza está ubicada la cámara de control remoto número 41. Esta cámara puede girar sobre sí misma casi completamente, tan solo no puede abarcar un pequeño sector hacia el Dique.



Figura 6-9. Situación de las cámaras de vídeo en el Dique del Este.

Las imágenes de esta cámara se visualizan en el centro de control de la policía del puerto y se registraron cuando fue posible. En la figura 6.12 se puede ver un ejemplo, el sector más interior, con el zoom lo más abierto posible, es decir máximo ángulo visual o máximo dominio, unos 33°.

Desde lo alto del espigón se puede visualizar (en condiciones atmosféricas buenas) un radio de hasta 1 km alrededor de su morro. La calidad de las imágenes y, por tanto, la resolución espacial del estudio disminuye con la distancia, por lo que no se puede ir más allá (resolución \cong dominio / 512 píxels).



Figura 6-10. Foto de la bocana del puerto de Barcelona

TRAZADORES

Para caracterizar los procesos de mezcla se vertieron manchas de leche teñida de verde amarillo con fluoresceína sódica. Se eligió este fluido porque no es contaminante, de hecho es nutritivo y se coloreó para mejorar el contraste.

Para determinar el campo de velocidades se necesitan trazadores puntuales o lagrangianos. Se hicieron pruebas con boyas lastradas de distintos tamaños y formas para ver cuál de ellas se veía menos afectada por el viento.

En cuanto a formas se lanzaron boyas huecas, flotadores salvavidas y unos globos semillenos de agua. Se probaron distintas boyas: verdes de 20 cm, rojas de 30 cm y blancas de 40 cm como se puede ver en la figura 6.13.



Figura 6-11. Foto de una serie de boyas

Se lastraron con unos deflectores metálicos con sección en L de 10x10x22,5 cm y 1 cm de espeso, (ver figura 6.14). Esta forma apuntada, como la proa de los barcos, favorece su arrastre. El lastre estaba suspendido a 1 m del centro de las boyas. Las boyas verdes y rojas tenían una L y las blancas dos. Para las verdes el lastre resultaba muy pesado y quedaban sumergidas unas $\frac{3}{4}$ partes siendo difícil distinguirlas. Por otro lado, las blancas eran muy poco manejables, por su tamaño, para tirarlas y recogerlas muchas veces.

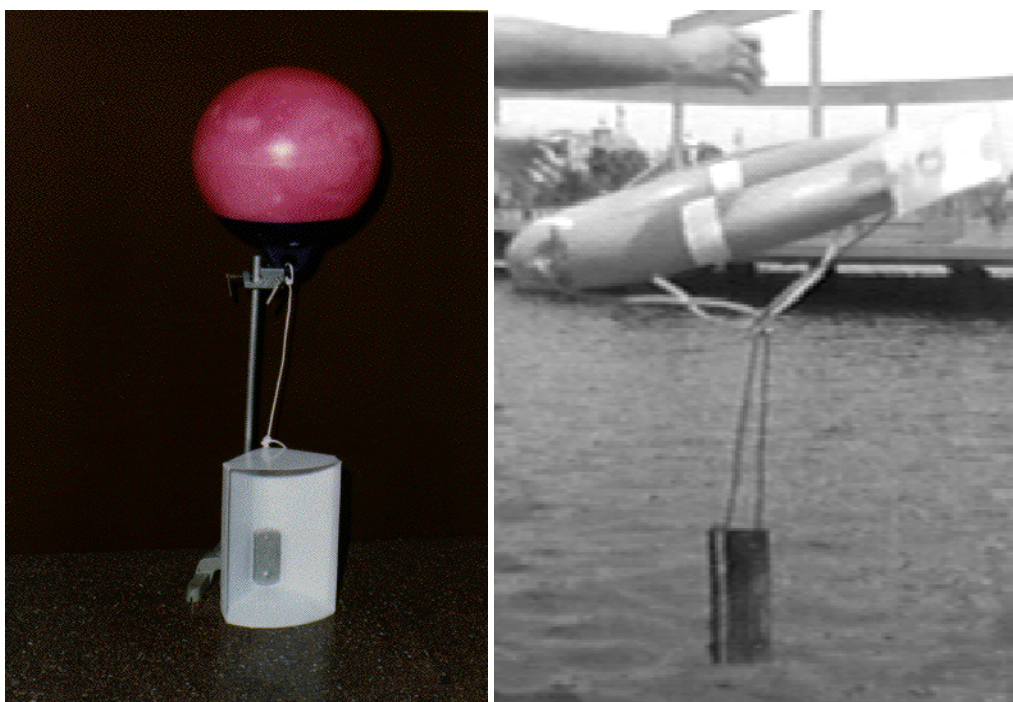


Figura 6-12. (Izq) Boyas lastradas y (der) salvavidas lastrados por el centro con deflectores metálicos con sección en L de 10x10x22.5 cm y 1 cm de espesor.

Los flotadores salvavidas eran como los exigidos en la normativa de seguridad naval, rígidos de 80 cm de diámetro y 10 cm de espesor (ver figura 6.15). Los salvavidas lastrados tienen la ventaja de que son más visibles pues son más grandes y se recogen fácilmente por la cuerda. Su poco espesor ofrece muy poca superficie resistente al viento. Sin embargo también se lastraron con deflectores metálicos de sección en L de 10x10x22,5 cm y 1 cm de espesor para obtener una velocidad promediada de una capa superficial de 50 cm en lugar de 5 cm, que es lo que se sumergiría si no se lastra.

Los globos eran especiales, de alta resistencia, inflables hasta 1 m de diámetro. Para los experimentos se llenaban con agua corriente y se inflaban con aire en la misma proporción, quedando de unos 40 cm de diámetro. No se hincharon más para evitar que se rompieran por el impacto con el agua o el transporte. La principal ventaja es que no es necesaria su recogida, agilizando los experimentos.

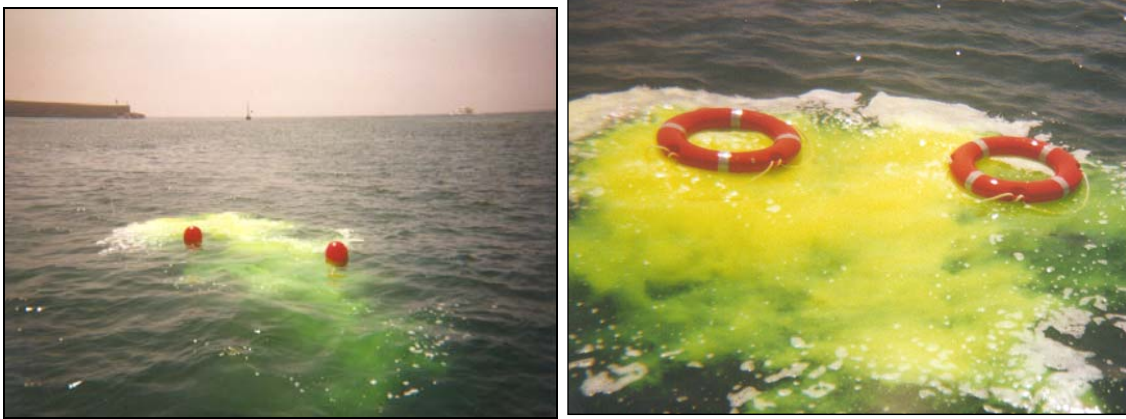


Figura 6-13. Fotos de los trazadores en el puerto.

POSICIONAMIENTO

Debido a la inclinación de la visual es necesario realizar una transformación de coordenadas, para lo cual deben identificarse en la imagen puntos de posición conocida. Cada vez que se movía la cámara o el enfoque se debían tomar nuevos puntos para establecer una transformación de coordenadas. El posicionamiento se realizó vía satélite con un G.P.S. diferencial de precisión centimétrica.

El sistema estaba instalado en una embarcación de 13 m de eslora, el Pedro Alvarado, tripulada por personal autorizado. También estaba equipada con sonar para realizar trabajos topográficos. Esta misma embarcación es la que se empleó para verter los trazadores (figura 6.16).

Es necesario disponer de un mecanismo de comunicación entre el centro de control de las imágenes, la embarcación y la cámara portátil para verificar el dominio visual de la zona, asociar los puntos de la pantalla con posiciones, informar sobre observaciones, paso de embarcaciones, etc. Para ello se dispuso de un sistema de Walky Talkies con un radio de acción suficiente para cubrir todo el dominio portuario.



Figura 6-14. Foto del equipo de posicionamiento y vertido

En la figura 6.17 se muestra el esquema de la planificación de las campañas respecto a los resultados, para cada día se representa simultáneamente el mapa de velocidades de corriente y de viento junto con el diámetro de las manchas un minuto después de su vertido.

Año	2000												2001																								
Meses	E	f	m	a	m	j	j	a	s	o	n	d	e	f	m	a	m	j	j	a	S	o	n	d	e	f	m	A	m	j	J	a	s	o	n	d	
Agentes forzadores: viento, marea, oleaje y corriente																																					
Cuantificación de las 6—141arbor6—141ción tratada y																																					
Análisis de viento																																					
Análisis de marea																																					
Análisis de oleaje																																					
Análisis de corriente																																					
Tratamiento de los datos de vídeo																																					
Tratamiento de imágenes de satélite																																					
Comparación entre los con datos bibliográfico																																					
Gestión integrada de los datos																																					
Informes internos																																					
Informe anual																																					
Informe final																																					

Figura 6-15. Planificación de la campaña

Además se presenta en la tabla 6.2 un resumen de los valores característicos de los agentes forzadores, (viento, oleaje y marea) y de los resultados obtenidos (corriente y dispersión de contaminantes) mediante los siguientes parámetros:

- El viento se caracteriza por su velocidad media diez minusal V10 en m/s, la velocidad máxima diez minusal Vmax en m/s, sus respectivas direcciones de origen respecto al N Dir10 y Dirmax en grados.
- El oleaje se caracteriza por su altura de ola significativa Hs en cm, su periodo de pico Tp en segundos y su dirección de procedencia DirM en grados.
- La marea se caracteriza por su elevación media cinco minusal respecto al nivel medio del mar en Alicante.
- La corriente se caracteriza por una velocidad media de los datos de cada boya (tomados cada diez segundos) y por su dirección media dirNE (de origen el N y sentido horario).
- La dispersión se caracteriza por el diámetro máximo D en m de las manchas un minuto después de su vertido, su coeficiente de dispersión Kl (velocidad de crecimiento) a un minuto en m²/s y su velocidad de advección V en cm/s.

local	Posición	Viento	Oleaje	Marea	Corriente	Difusión
-------	----------	--------	--------	-------	-----------	----------

Hora	Xutm	Yutm	Z(m)	V10	Vmax	Dir10	DirM	Hs(cm)	Tp(s)	DirM	cm	cm/s	DirNE	D(m)	Kl(m ² /s)	Vcm/s
11:08	30907	76489	19,5	51	68	190	183	47	4,38	144	32	19	9			
11:15	30849	76505	19,1	55	73	188	184	47	4,39	143	31	47	28	9,4	0,9	10,1
11:19	30899	76492	20,0	55	73	188	185	47	4,40	143	30	20	63			
11:32	30829	76405	18,9	50	65	189	185	47	4,41	142	30	53	28			
11:37	30799	76304	18,8	45	56	190	168	47	4,42	141	30	27	28	15,1	4,1	27,1
11:57	30783	76422	17,7	39	56	205	207	47	4,45	136	29	31	18			
12:04	30729	76444	17,8	52	66	192	186	47	4,46	136	29	26	-31			
12:06	30737	76435	18,0	52	66	192	186	47	4,46	136	29	17	-84			
12:09	30697	76387	17,5	52	66	192	186	47	4,46	136	29	9	-31			
12:22	30606	76486	15,8	50	60	192	197	47	4,46	135	30	23	0	18,3	1,3	9,2
12:25	30701	76495	17,0	43	61	189	181	47	4,46	135	31	29	0			
12:26	30738	76495	12,0	43	61	189	181	47	4,46	135	30	37	-3			
12:30	30451	76506	15,4	43	61	189	181	47	4,46	134	29	27	0	5,2	0,2	8,8

Tabla 6.2. Resultados del día 5-7-99

6.4 IMÁGENES POR SATÉLITE SAR

Las imágenes del Radar de Apertura Sintética son un proceso de detección activa donde se emite radiación electromagnética de una longitud de onda de pocos centímetros y se procesa una correlación cruzada durante cierto tiempo del barrido. Su representación gráfica se puede interpretar como un mapa de la rugosidad superficial.

Se han utilizado principalmente imágenes de los satélites ERS-1 y ERS-2 (figura 6.18), de la Agencia Espacial Europea en el ámbito del proyecto Europeo Clean (Jolly et al. 2000). El proyecto ENVIRONMENT - CLEAN SEAS - ENV4-CT96-0334 está dentro del programa de cooperación internacional de la Comunidad Europea que integra los procesos de Monitoreo Integrado de Areas Costeras (Integrated Coastal Area Management-ICAM). El Mediterráneo fue clasificado como zona costera de acción prioritaria en 1996 en el 5th Programa de Accion Ambiental (5th Environmental Action Programme) que resalto la importancia del entendimiento de la dinámica física, biológica y humana de la zona costera para un mejor gestión de la misma.

En cada órbita del satélite se obtienen 20 imágenes de un dominio de unos 100x100 km (véase el mapa de dominios en la figura 6.19) para la zona de Cataluña-Golfo de León, con una resolución de unos 50 m/pixel y un periodo de unos 35 días. También se tiene acceso a las imágenes del satélite RADARSAT, de la Agencia Canadiense del espacio, capaz de una cobertura bastante más elevada, hasta 300x300 km, y mayor resolución 12 m/pixel. La combinación de varios sensores SAR permite prever que se pueda contar con imágenes de una misma zona cada 5-10 días

SAR sensor	Mode	Resolution (m)	Pixel spacing (m)	Swath width (km)	Incidence angle (°)
ERS-2	PRI	30×26.3	12.5×12.5	100	20–26
ENVISAT	Image Mode (Precision Image)	30×30	12.5×12.5	100	15–45 (7 swaths)
RADARSAT-1	SCN	50×50	25×25	300	20–46
RADARSAT-1	SCW	100×100	50×50	450–500	20–49
ENVISAT	WSM	150×150	75×75	400	16–44

Tabla 6.3 RADARSAT International (2000), European Space Agency (2002) y ERS-2 Web-site (2004).

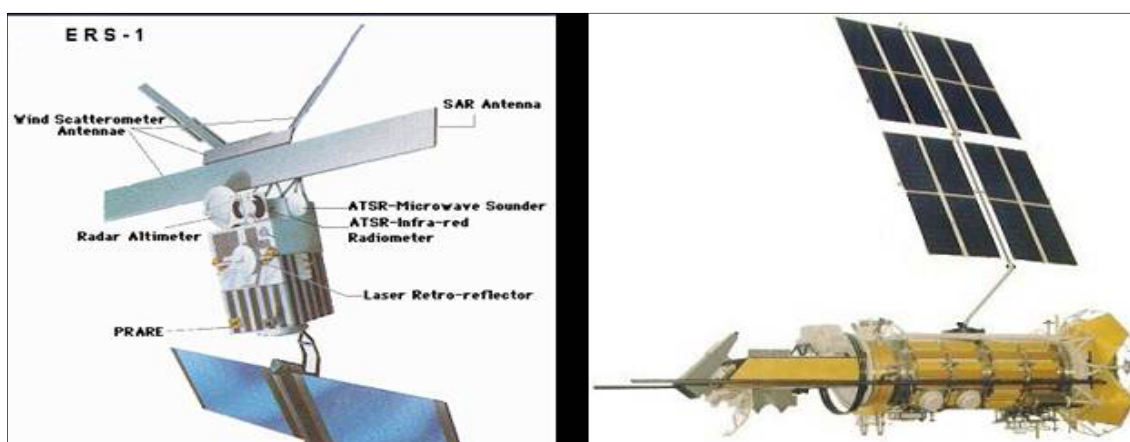


Figura 6-16. Satélites ERS1 y ERS2

En el marco del convenio con la Autoridad Portuaria de Barcelona se analizaron las imágenes de la franja de Cataluña y el Golfo de León, cuyos resultados se publicaron en Díez et al. (1999), Platonov (2002) y posteriormente se publicaron más resultados en Platonov et al. (2008), Matulka (2009) y Tarquis et al (2011). Las imágenes SAR detectan los vertidos con mejor definición que los satélites del espectro visible, ya que no están afectados por las nubes, como se puede ver en la comparativa de la figura 6.20, ni por el grado de luminosidad. Disponen de una buena cobertura y funcionan con un rango de viento de suave a 12-14m/s, aunque la detección depende del tipo de hidrocarburo y de su vejez.

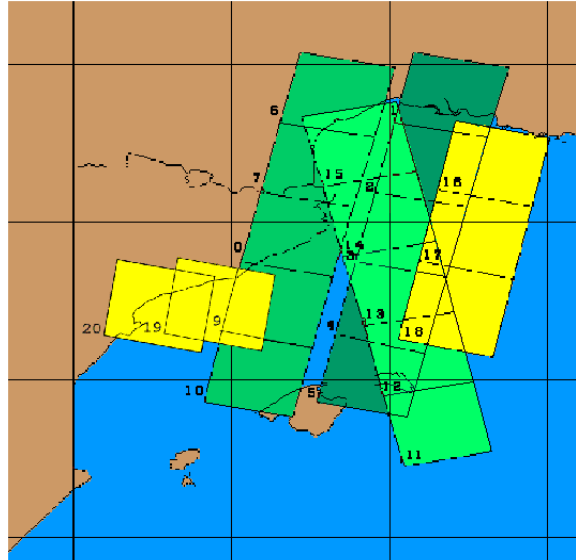


Figura 6-17. Mapa de la zona analizada en Cataluña y el Golfo de León. Díez et al 1999.

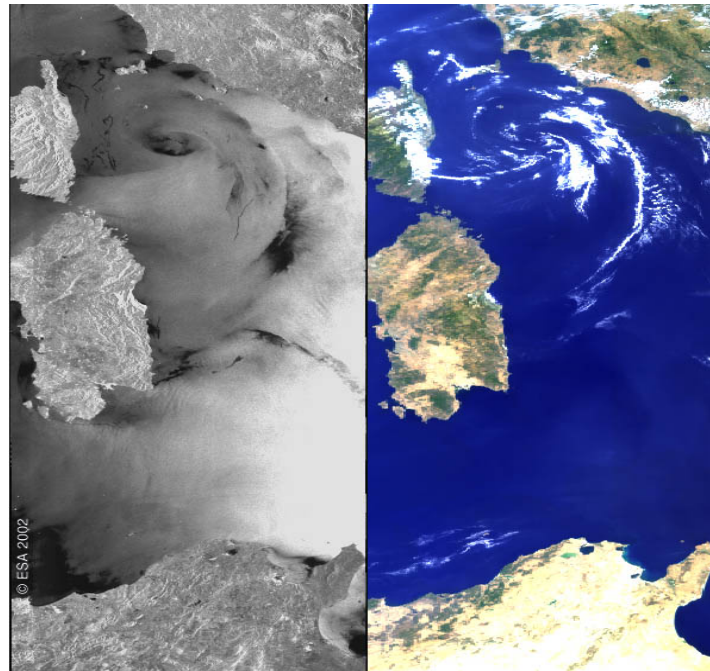


Figura 6-18 Comparación de imagen satélite de SAR y de MERIS (visible) de ENVISAT (ESA).

7 RESULTADOS

Una vez obtenidas las imágenes, se analizan y correlacionan con el resto de medidas para caracterizar los procesos hidrodinámicos: dispersión, espectro de oleaje, corriente, marea, remolinos, cizalla, etc. A continuación se describen algunos de los resultados obtenidos.

Del análisis de la evolución del tamaño de las manchas se obtuvieron los coeficientes de difusión en los diferentes escenarios.

Del análisis de series temporales de una línea se obtuvieron espectros de energía.

Del promediado de imágenes se analizó la batimetría, presencia de barras y rotura de las mismas. También es posible cuantificar la evolución de la línea de orilla y de ondas de borde.

Para aislar el efecto de la corriente se analizó la velocidad de las boyas lagrangianas. En el caso de la zona de rompientes de la barra del Trabucador se identificó una corriente de retorno "Rip current".

En el puerto de Barcelona se correlacionó la velocidad de las boyas y del viento.

El análisis fractal de las imágenes de satélite permite distinguir el origen de las manchas y la vorticidad de la zona y estimar la difusión a diversas escalas.

Estos resultados se compararon con otras medidas y resultados de simulaciones numéricas.

7.1 COEFICIENTES DE DISPERSIÓN

El método de análisis descrito anteriormente permite, de forma sencilla y eficaz, obtener información cuantitativa sobre los coeficientes de dispersión a partir de imágenes de vídeo y estudiar las variaciones locales y temporales de los efectos de la turbulencia en zona de rompientes.

Se analizan los coeficientes obtenidos en las campañas de campo (tabla 7.1)

Campaña	Ebro'93	Ebro'96	Vilanova	Recife	Barcelona
N ^{er} Experimentos	12	45	8-10	40	33
Viento (m/s)	0-10	0-15	0-10	0-25	0 – 10
Oleaje (m)	0.1-0.75	0.1-0.5	0.1-2	0.5-3	0-0.50
Corriente (m/s)	0-1.5	0-0.65	0-0.1	0-3	0-0.30

Tabla 7.1. Condiciones de las distintas campañas de campo.

7.1.1 Resultados de Delta 93

Para los experimentos de la Barra del Trabucador, realizados a distintas distancias de la orilla, con condiciones de oleaje y viento similares, el rango de valores del coeficiente de dispersión transversal fue de 0,005 a 0,035 m²/s.

Estos valores son ligeramente superiores a los obtenidos en experimentos previos, de 0,001 a 0,025 m²/s, para el caso de Vilanova, con una playa confinada entre espigones sin posibilidad de generación de corrientes longitudinales fuertes.

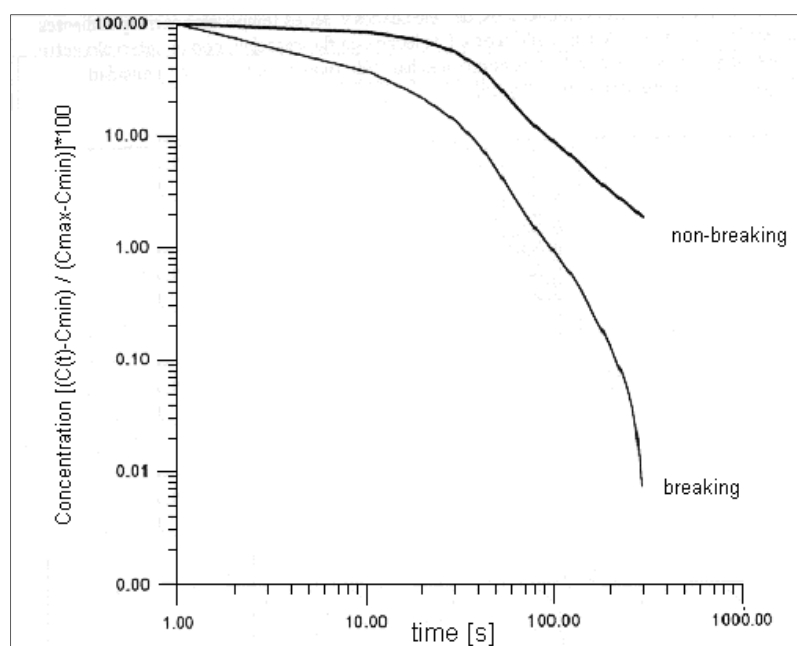


Figura 7-1. Comparación del proceso de mezcla con y sin rotura del oleaje. Bahía 1997

La comparación de la evolución de las manchas en zonas de oleaje con o sin rotura muestra que los valores de los coeficientes de mezcla y de la anisotropía son mucho

mayores en el caso con rotura que en el caso sin rotura. La figura 7.1 muestra la comparación del decaimiento relativo entre estos dos casos. Se puede ver que la rotura favorece claramente el proceso de mezcla debido a la turbulencia generada por ésta y que esta diferencia crece con el tiempo.

El comportamiento de la dispersión es fuertemente anisotrópico. El rango del coeficiente transversal en rotura es de 0,035 a 0,376 m^2/s con una fuerte variación temporal, mientras que el longitudinal permanece constante como 0,124 m^2/s (figura 7.2). Si se cuantifica la anisotropía como el coeficiente de la varianza longitudinal entre la transversal V_x/V_y se observa que éste también es mayor para oleaje en rotura. Se ha observado que el coeficiente de difusión aumenta donde es mayor la corriente longitudinal, debido a que la mayor turbulencia está asociada a velocidades mayores.

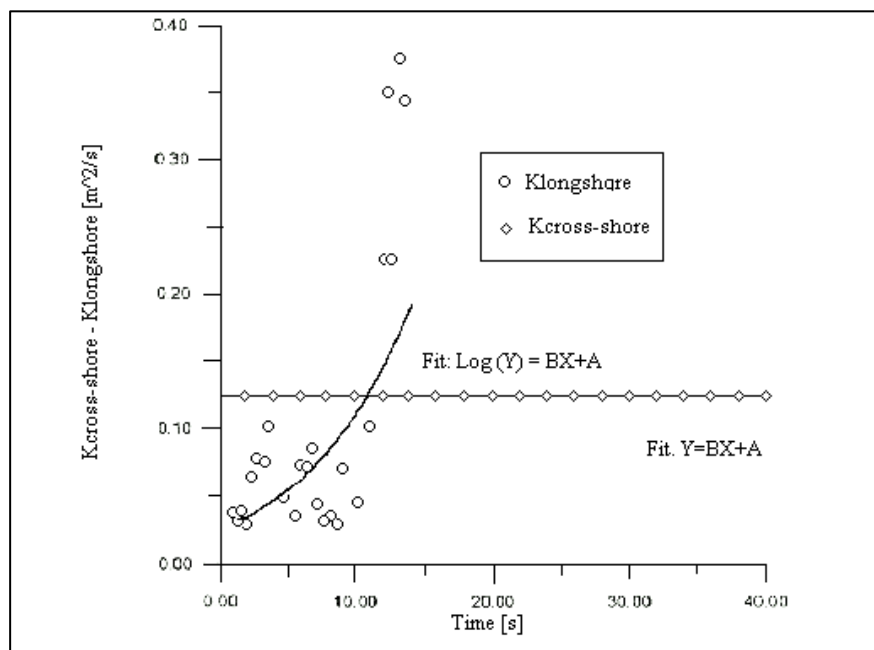


Figura 7-2. Evolución de los coeficientes de difusión. Bahía 1997

La distribución transversal de los coeficientes de dispersión es casi parabólica según Thornton (1970), Thornton et al. (1983), Sasaki et al. (1976) y Rodríguez (1997), siendo el máximo donde la corriente longitudinal es máxima (figura 7.3). Los resultados experimentales son coincidentes con las predicciones del modelo propuesto por Rodríguez et al. (1995) y confirman la mezcla vertical intensa en la zona de surf. A partir de estos resultados, se considera que la Ley de Richardson de 4/3 no es aplicable a la difusión de zona de surf porque los picos de espectro de energía (generados debido a la ruptura de la onda) son demasiado cercanos y el subrango inercial es muy bajo. Otros estudios sugieren que el coeficiente de dispersión de zona de surf depende fuertemente del tamaño de la mancha de trazador, según los valores de Horikawa et al. (1978) y Horikawa (1988).

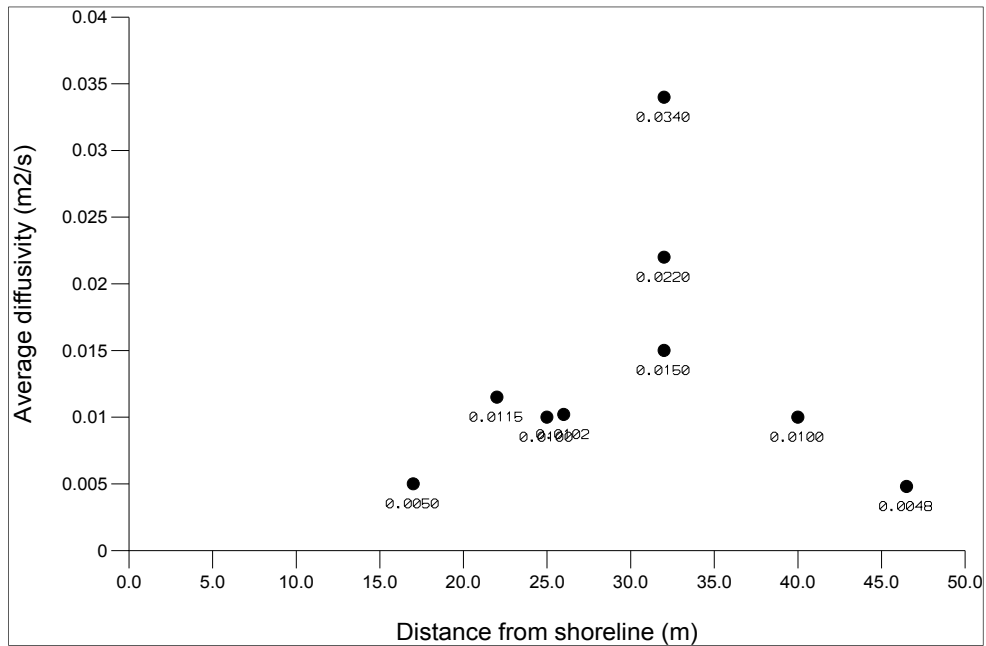


Figura 7-3. Variación del coeficiente de difusión según la distancia a la orilla. Bahía 1997

7.1.2 Resultados de Delta 96

Los experimentos se correlacionaban con otras variables meteorológicas como viento y presión (figuras 7.4 y 7.5).

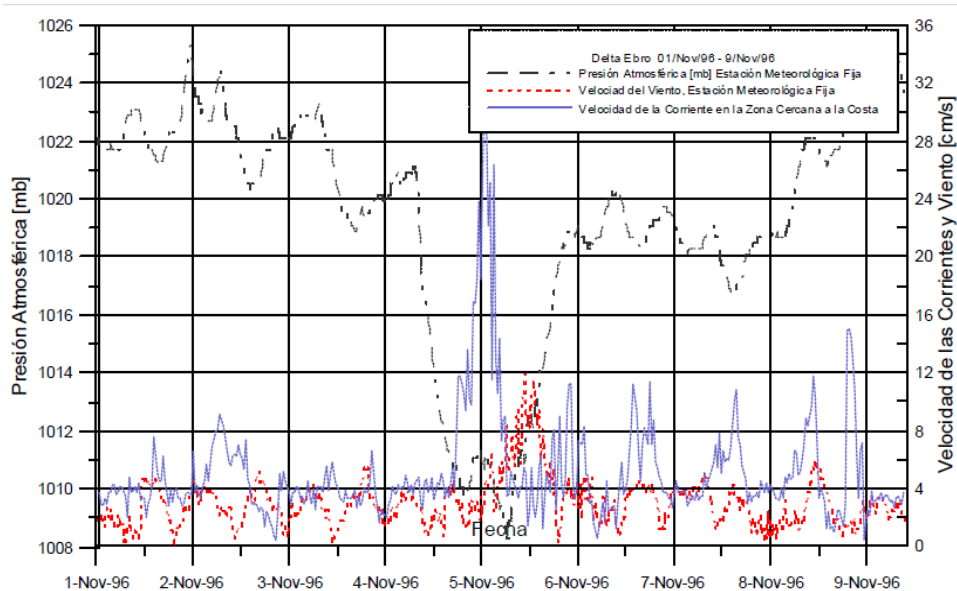


Figura 7-4. Influencia de variables meteorológicas

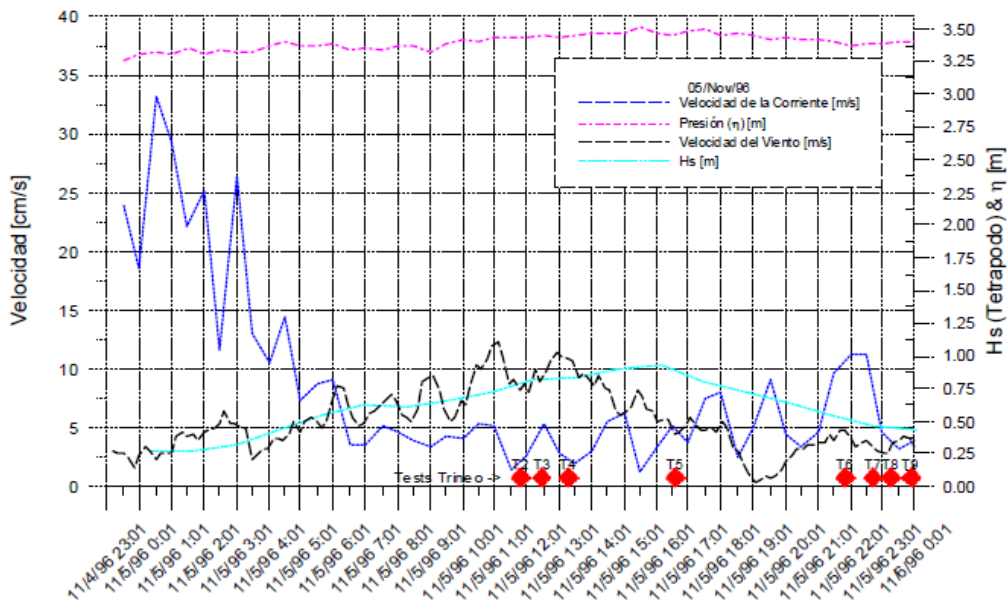


Figura 7-5. Datos del día 5.11.96

Del análisis de las manchas se obtuvo la evolución de la dispersión. En la fase inicial, el coeficiente de dispersión es casi constante, ya que inicialmente la mancha, vertida en la superficie, se mezcla verticalmente y sólo después de ocupar casi toda la columna de agua se expande horizontalmente. Debe aclararse que se trata de manchas pequeñas y medianas (con un diámetro medio de unos 3 m) con respecto a las dimensiones dominantes: en la escala vertical la profundidad y la altura de ola que son del orden del metro, mientras que en la escala horizontal la longitud de onda es aproximadamente de 20 m y el ancho de la zona de rompientes de unos 50 m. Los efectos de la corriente longitudinal, en la advección y distorsión de las manchas, fueron una característica dominante durante los experimentos del Delta del Ebro. Las mediciones lagrangianas, por vídeo, y eulerianas, con correntímetros electromagnéticos, de corrientes longitudinales fueron similares en todos los casos, con una intensa mezcla vertical en la zona de rompientes (figura 7.6).

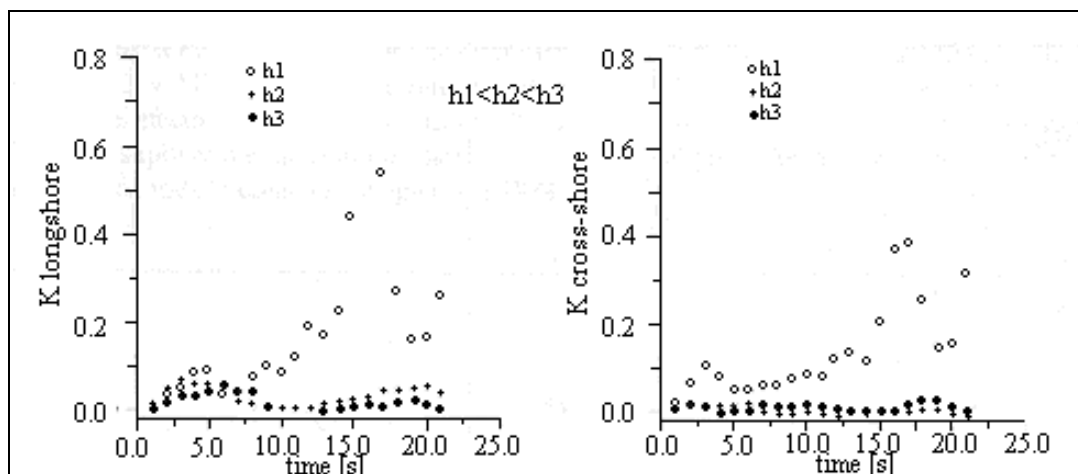


Figura 7-6. Evolución del coeficiente de difusión con el tiempo.

7.1.3 Resultados de Recife (Brasil)

La evolución de los trazadores en los experimentos de Brasil se realizó analizando el decaimiento de su centro y la evolución de su tamaño. Los resultados, en parte, se analizaron junto Maria Ozilea Bezerra mientras se desarrollaban los experimentos en el puerto de Barcelona. Los resultados de todos los experimentos (Recife, Vilanova, Delta y Barcelona) se analizaron conjuntamente y se presentaron en: Bezerra et al. (1998), Díez et al. (1999b, 2000, 2005, 2006, 2008), Redondo et al. (2009).

En la mayoría de los experimentos, las isolíneas de concentración del trazador en la difusión de la mancha tienen una forma más semejante a una elipse. Aceptando esta premisa, las elipses son posicionadas en relación a un sistema de coordenadas x e y determinado, pudiendo coincidir o no coincidir con alguno de los ejes (ver por ejemplo la figura 7.7).

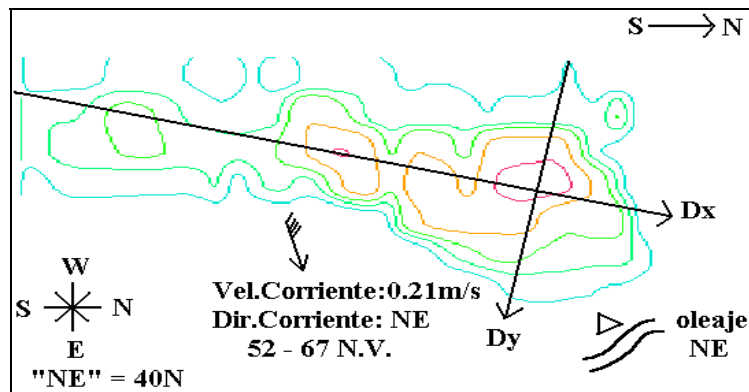


Figura 7-7. Distribución de concentración Olinda 1 13.10.95, exp. 2, marea de reflujo.

Las dimensiones de la mancha cambian en el tiempo en las direcciones del eje de la elipse (Figura 7.8).

La intensidad máxima, usualmente se encuentra cerca del centro de la mancha y generalmente decrece con el tiempo (figura 7.9), aunque eso puede cambiar según el tipo de trazador y de la hidrodinámica. La mancha puede también alargarse en varias direcciones o sencillamente flotar. La intensidad de estos fenómenos depende de los parámetros que gobiernan el proceso, como influencia del gradiente de velocidad de la corriente, del oleaje, de la cizalla producida por el viento en la capa superficial, del tiempo etc.

Olinda 2

Día: 14/10/96 - Marea: Sizigia - Exp.:4 - H:17:20

Difusion de Trazador Continuo

$$KX0 = V * DX0 = 0.200035 * 4.32637 = 0.865425423 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$$

$$KX45 = V * DX45 = 0.200035 * 13.327945 = 2.666055478 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$$

$$KY0 = V * DY0 = 0.093887 * 3.43706 = 0.322695252 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$$

$$KY45 = V * DY45 = 0.093887 * 7.661975 = 0.719359846 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$$

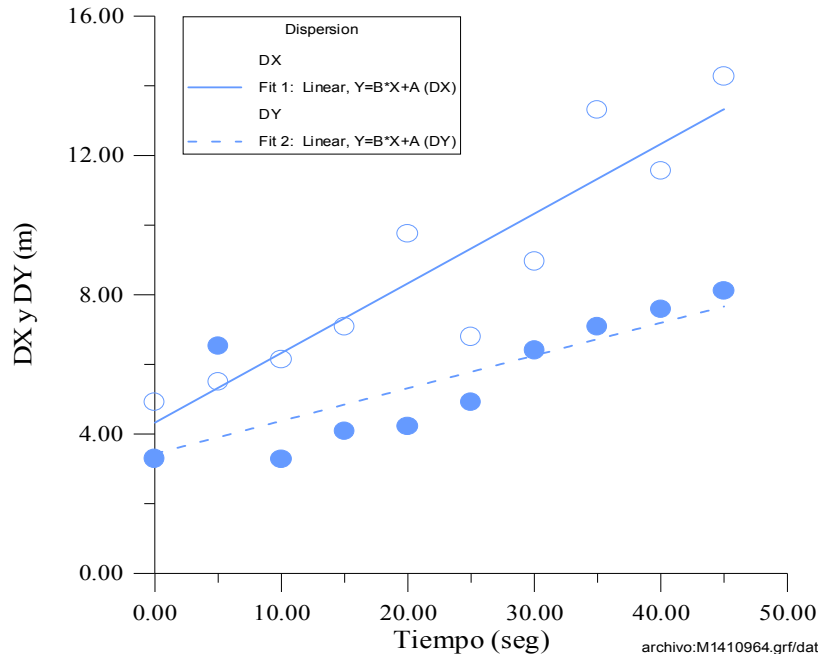


Figura 7-8. Evolución de la dimensión de trazador continuo en el tiempo.

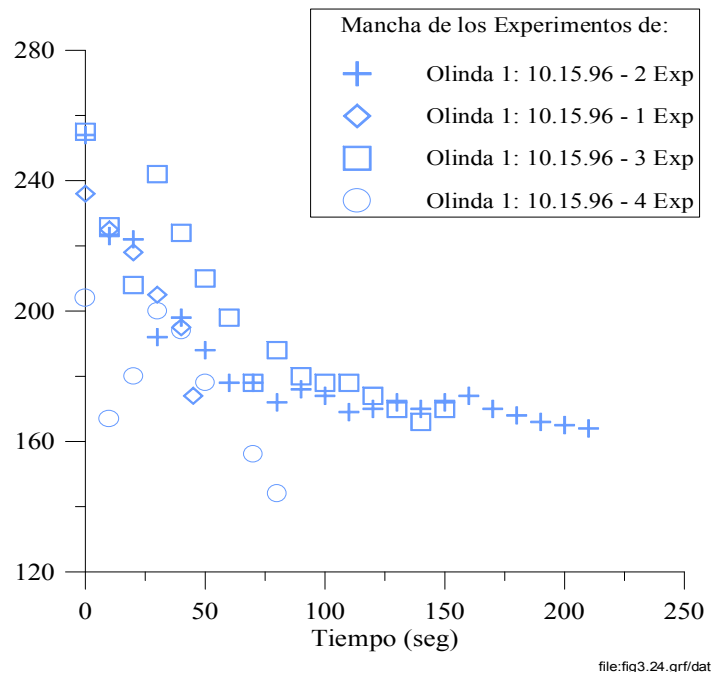


Figura 7-9. Decaimiento de la intensidad del centro del trazador continuo. (Bezerra 2000)

7.1.4 Resultados de Vilanova i la Geltrú

Los resultados de los experimentos de Vilanova i la Geltrú están publicados en la tesis de Maria O Bezerra (2000). En general se trata de condiciones de baja energía, sin marea, por lo que la difusividad es baja.

Según Ozmidov (1990), las curvas de concentración siguen la distribución normal gaussiana simétrica en relación al tiempo total, según la relación $\sigma^2=2Dt$, siendo D el coeficiente de difusión molecular en el mar y t el tiempo, lo que supone que la concentración decrece exponencialmente con el tiempo. En el caso de Vilanova se puede confirmar esta distribución (Figura 7.10).

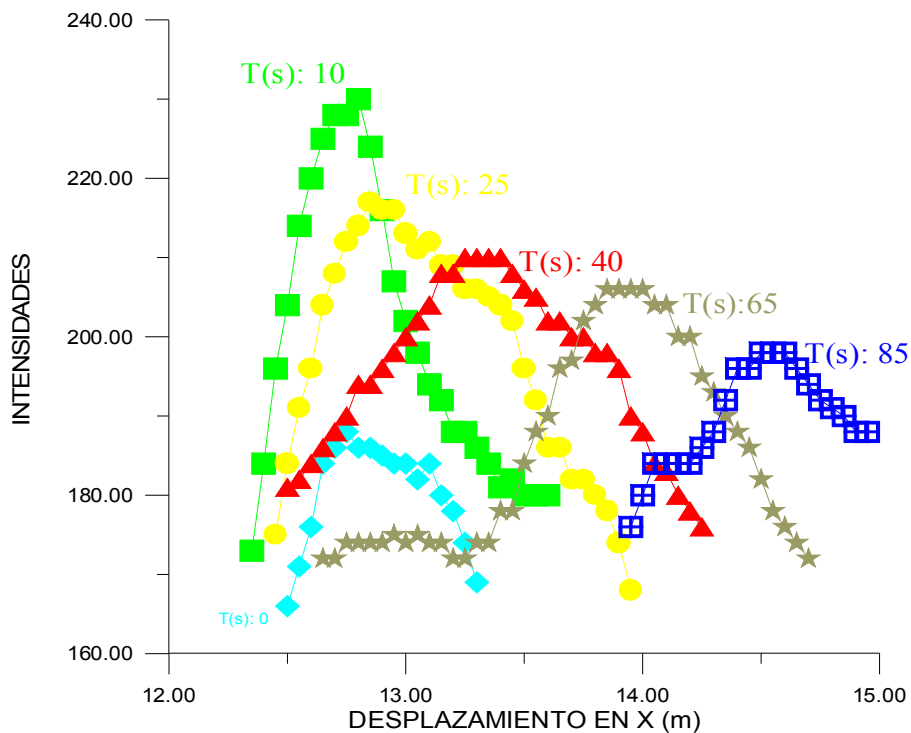


Figura 7-10. Distribución de concentración de 6 manchas.

En estos experimentos también se analizó la fricción por viento u^* a partir de perfiles logarítmicos de viento.

7.1.5 Resultados del puerto de Barcelona

5 DE JULIO DE 1999.

Durante las medidas, el viento registrado en la estación meteorológica a 10 m de altura venía de dirección Sur (180-190°) y con rachas entre 4,3 y 7,3 m/s. El oleaje llegaba de levante (140°) con una altura significativa de 47 cm y un periodo de pico de 4,4 s. La marea estaba subiendo suavemente a un ritmo de 1 cm por hora.

Las boyas en la parte interior del puerto son arrastradas a 20-30 cm/s por el viento y reforzadas por la marea creciente que acumula agua en el interior del puerto. En la parte exterior las boyas alcanzan los 50 cm/s cerca del dique aunque lejos no llegan a los 20 cm/s y se desvían 30° respecto la dirección del viento por el efecto de la corriente pero también siguen una dirección NE. Este hecho se ve reforzado por el dato cualitativo de la pluma del Llobregat, que acaba metiéndose en el puerto al mediodía. Los flujos medios se presentan en la Figura 7.11.

Se vertieron cuatro manchas de seis litros de leche teñida con fluoresceína:

- Una exterior, que en un minuto alcanzó un diámetro de 9,5 m y se desplazaba a 10 cm/s, dando un coeficiente de dispersión de 0,9 m²/s.
- Una mancha en la prolongación del dique, que en un minuto alcanzó un diámetro de 15,1 m y se desplazaba a 27 cm/s a la misma velocidad que las boyas, lo que indica que la columna estaba muy bien mezclada, pues la velocidad superficial y la de la columna de mezcla son iguales. La superposición de agentes forzadores, viento, corriente y marea, produce el máximo coeficiente de dispersión de 4,1 m²/s.
- Una frente al morro, que en un minuto alcanzó un diámetro de 18,2 m y se desplazaba a 9 cm/s dando un coeficiente de dispersión de 1,3 m²/s debido a la disipación energética que produce inicialmente la difracción.
- Una mancha en la parte interior, que en un minuto alcanzó un diámetro de 5,2 m y se desplazaba a 9 cm/s dando un coeficiente de dispersión de 0,2 m²/s.

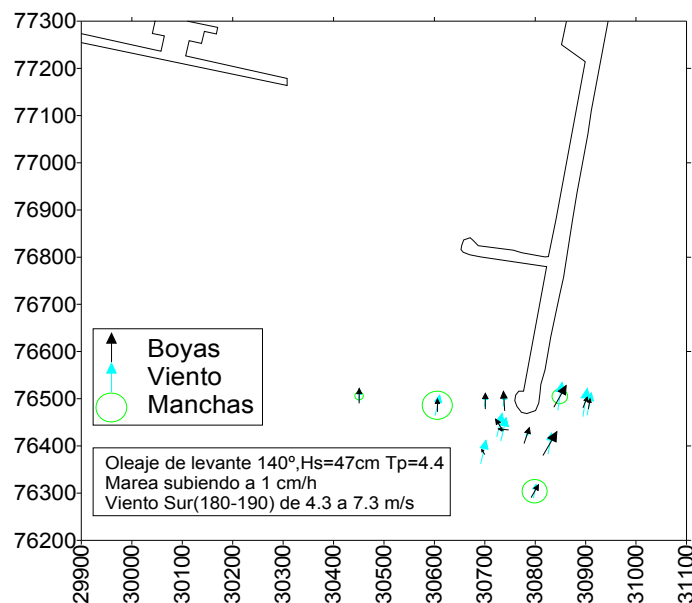


Figura 7-11. Flujos promedio medidos del 5 de Julio.

13 DE JULIO DE 1999.

Durante las medidas, el viento medido en la estación meteorológica a 10 m de altura venía de dirección Sur ($180-200^\circ$) y con rachas entre 3,5 y 8,3 m/s. El oleaje llegaba de levante (118°) con una altura significativa de 50 cm y un periodo de pico de 5,2 s. La marea estaba bajando suavemente a un ritmo de 3 cm por hora.

Las boyas en la parte interior del puerto eran arrastradas a 20-30 cm/s cuando había calma hacia el interior del puerto y a 40-50 cm/s en las rachas de viento. En la parte exterior, las boyas siguen el oleaje de levante en lugar del viento, sur, a unos 20 cm/s. En la prolongación se producen velocidades de 40-50 cm/s debido a la difracción. Los flujos medidos durante ese día se representan en la figura 7.10.

Se vertieron seis manchas de seis litros de leche teñida con fluoresceína:

- 1 mancha en la prolongación del dique que, en un minuto alcanzó un gran diámetro de 12,5 m debido a su advección a 17 cm/s, pues su coeficiente de dispersión era pequeño $0,7 \text{ m}^2/\text{s}$.
- 1 frente al morro, una que en un minuto alcanzó un diámetro de 13,9 m aunque se desplazaba despacio, a 8 cm/s, debido a la dispersión producida por la difracción de $2,5 \text{ m}^2/\text{s}$.
- 2 en la zona de sombra producida entre el morro y el martillo del Cajonero, una en el interior de $D=12 \text{ m}$ $v=4 \text{ cm/s}$ y $k=0,8 \text{ m}^2/\text{s}$ y otra cerca del morro de $D=12 \text{ m}$ a $v=4,6 \text{ cm/s}$ y $k=1,7 \text{ m}^2/\text{s}$, el doble que la anterior, pues puede que estuviese afectada por la difracción
- 2 manchas en la parte interior, que en un minuto alcanzaron un diámetro de 6,5 m y se desplazaban a 5 y 9 cm/s dando unos coeficientes de dispersión de $0,2 \text{ m}^2/\text{s}$.

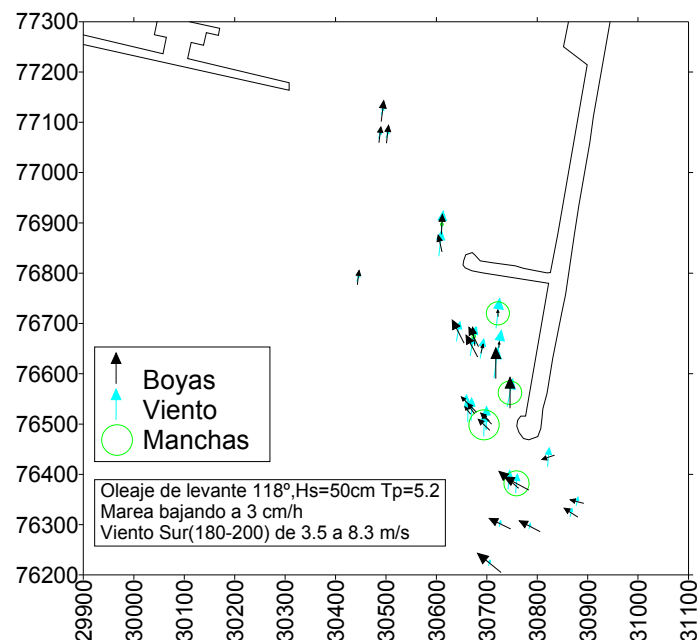


Figura 7-12. Flujos promedio medidos del 13 de Julio

20 DE JULIO DE 1999.

El viento medido en la estación meteorológica a 10 m de altura provenía de Xaloc (145°) y era muy suave, prácticamente inexistente ("calma chicha") entre 2,5 y 5 m/s. El oleaje llegaba de levante (110°), con una altura significativa de 47 cm y un periodo de pico de 4,6 s. La marea estaba en pleamar.

Las boyas en la parte interior del puerto eran suavemente arrastradas por el viento hacia el interior del puerto a 10-15 cm/s cuando había calma, llegando a 27 cm/s cuando soplabla el viento. En la parte exterior las boyas eran arrastradas hacia el NNW a 10 cm/s por el viento y el oleaje de levante. En la prolongación la difracción hace meterse lentamente las boyas al puerto. En la figura 7.11 se han esquematizado los flujos de ese día.

Se vertieron ocho manchas de seis litros de leche teñida con fluoresceína:

- 2 en la parte exterior, una que se hizo de 10 m y apenas se movía a 5 cm/s dando un $k=1,2 \text{ m}^2/\text{s}$ y otra que creció mucho más debido a su advección a 23 cm/s, dando un $k=2,9 \text{ m}^2/\text{s}$ relativamente alto, posiblemente debido a que sea una zona de cizalladura.
- 2 manchas en la prolongación del dique, que en un minuto alcanzaron $D=7\text{m}$ y 10 m. La primera, más cercana, se metía en el puerto a 10 cm/s, mientras que la más alejada apenas se movía; sus coeficientes de dispersión eran pequeños, de 0,3 y 1 m^2/s respectivamente.
- 1 frente al morro, que en 1 minuto alcanzó un diámetro de 11 m y que estaba casi quieta, a 8 cm/s, y se dispersaba lentamente a 1,3 m^2/s .
- 1 en la zona de sombra producida entre el morro y el martillo del Cajonero, de $D=6 \text{ m}$ $v=5 \text{ cm/s}$ y $k=0,16 \text{ m}^2/\text{s}$.
- 2 manchas en la parte interior, que en un minuto alcanzaron un diámetro de 9 m y se desplazaban a 5 cm/s, dando unos coeficientes de dispersión de 0.9 m^2/s .

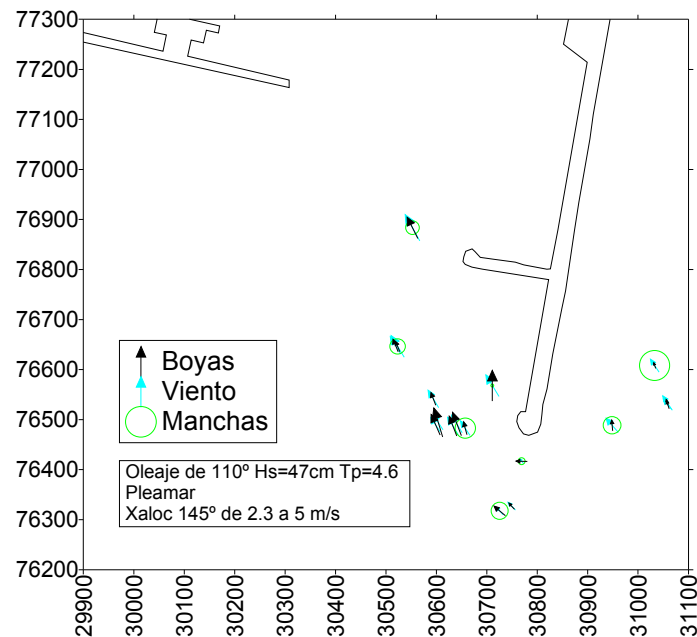


Figura 7-13. Flujos promedio medidos del 20 de Julio

25 DE FEBRERO DEL 2000.

El viento medido en la estación meteorológica a 10 m de altura era un Garbí (210°) de intensidad entre 6 y 11 m/s. El oleaje llegaba de levante (110°) con una altura significativa de 58 cm y un periodo de pico de 4,92 s. La marea estaba bajando a 1,7 cm/h.

Las boyas en la parte interior del puerto son suavemente arrastradas por el viento hacia el interior del puerto a unos 30-40 cm/s en el centro del canal y a unos 20 cm/s aguas afuera. En la parte del morro, el flujo se ve obligado a dividirse para bordearlo, la línea de flujo exterior alcanza velocidades de 30-38 cm/s mientras que la línea interior apenas alcanza los 20 cm/s, tal y como se representa en la figura 7.12.

A pesar de que el viento era mayor que en los días de verano, no se aprecia un incremento significativo de las velocidades debido a que la dirección del viento era contraria a la corriente litoral y a la marea, que era vaciante. En ausencia de estratificación, el momentum de la capa superficial se transmite a toda la columna de agua.

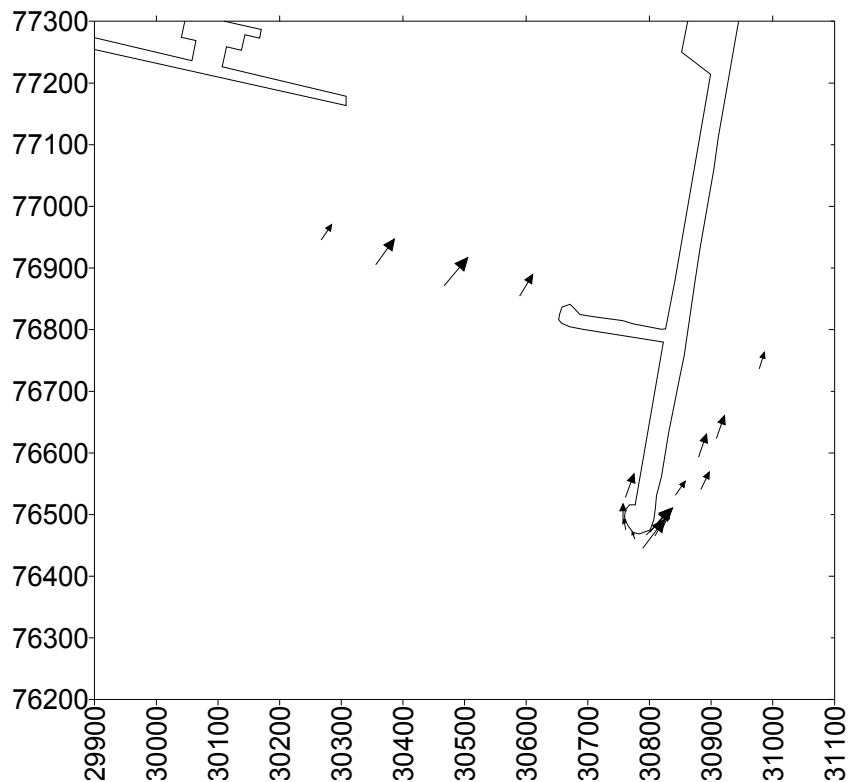


Figura 7-14. Flujos promedio medidos del 25 de Febrero del 2000 de 12 a 16h.

17 DE MARZO DEL 2000

El viento registrado refleja un cambio brusco (figura 7.15) hacia las 12:30 del mediodía tanto de intensidad que subió de 2-3 m/s a 6-7 m/s como de dirección, que roló de Ponent (275°) a Migjorn (185°. La marea estaba bajando a 1 cm/h).

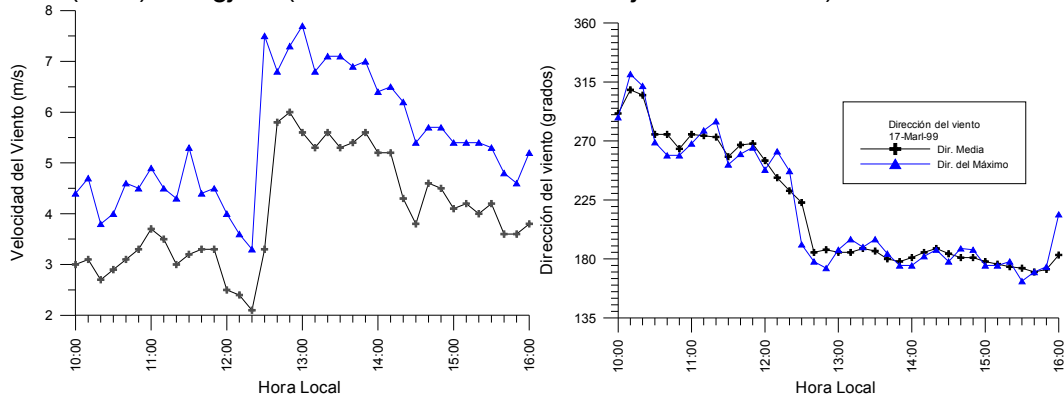


Figura 7-15. Velocidad y dirección del viento el 17-3-2000.

Las boyas de la parte interior, lanzadas a las 10.30, se dirigen desde el muelle de inflamables al dique del Este tangentes al nuevo contradique y al martillo, describiendo un gran remolino de giro horario a unos 10 cm/s. Sin embargo, las lanzadas a las 12:50 son arrastradas por el viento hacia el interior del puerto a unos 10 cm/s.

En la parte exterior, las boyas siguen la corriente litoral NS en contra del suave viento a 10 cm/s. En la prolongación del dique del Este se hicieron dos transectos paralelos al dique. Las boyas del lado más exterior se desplazan longitudinalmente, siguiendo la corriente litoral hacia el Sur a unos 10 cm/s.

Las boyas del transecto interior parecen describir una corriente ortogonal a la primera (Figura 7.16) pero este desplazamiento es debido al gran oleaje generado por un Fast Ferry que pasó poco después de lanzar la última boya y que afectó a las tres últimas boyas. De hecho, la última (más cercana al morro) se dejó hasta después del siguiente tramo, que posiblemente también esté afectado por el oleaje.

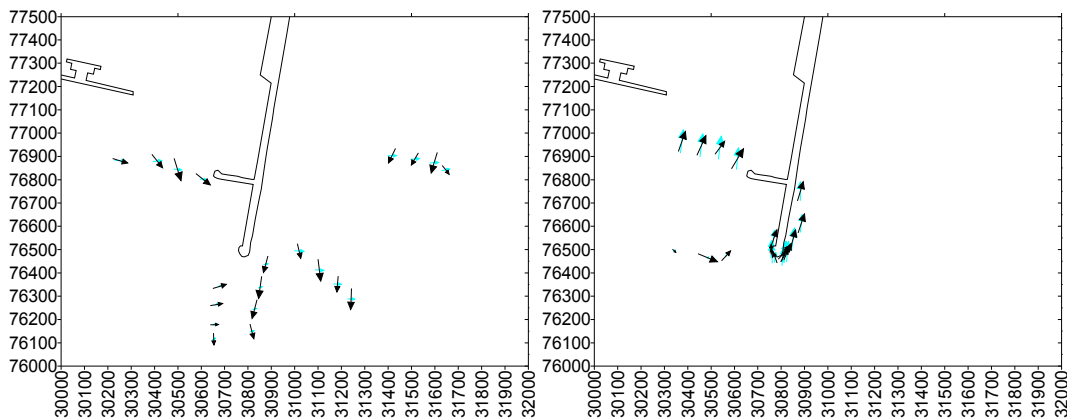


Figura 7-16. Flujos promedio medidos del 17 de Marzo del 2000

7.2 DIFUSIÓN A GRAN ESCALA

Los primeros resultados se presentaron en Díez et al. (1999a), Redondo et al. (2000) y después Platonov (2009). Las imágenes muestran efectos a gran escala de la superficie del mar como grandes manchas o remolinos, con los que se puede estudiar la contaminación y vorticidad de grandes zonas.

La técnica del tratamiento de imágenes se usó con las imágenes de satélite SAR para analizar el comportamiento de las manchas detectadas en el mar. A gran escala, el medio más efectivo de detectar vertidos de hidrocarburos en la superficie del océano es el Radar de Apertura Sintética SAR. La capa de crudo elimina las ondas capilares de la superficie del mar, reduciendo considerablemente las pequeñas ondas gravitatorias y disminuye el coeficiente de rugosidad de la superficie marina hasta 2-3 veces. También la película de petróleo cambia la intensidad y la composición espectral de la luz solar y de las ondas electromagnéticas que penetran en el agua. La capa de crudo de 30-40 m⁻⁶ absorbe completamente las ondas de la luz infrarroja. Las capas más gruesas interrumpen el intercambio de gases entre la atmósfera y el ambiente marino. Por ello se pueden obtener imágenes sin la necesidad de una fuente de iluminación, de forma que la noche o la cobertura de nubes no encubran a los posibles infractores.

Sin embargo, el control no es tan directo, pues no se dispone en la actualidad de un registro continuo de imágenes SAR. Por ello, cuando se localiza una mancha en una zona, se ha de analizar para determinar, en primer lugar, su composición (si se trata de plancton o de hidrocarburo) y en segundo lugar, su origen, mediante una simulación numérica. Por último, identificar las embarcaciones que pasaron por la zona del vertido. Es importante la información adicional de otros sensores y parámetros ambientales, que permiten inicializar modelos de dispersión turbulenta en la superficie del mar. Se presentan experimentos comparativos que permiten calibrar las medidas de difusión y técnicas usadas para identificar las manchas de petróleo.

El estudio de las imágenes por satélite SAR ha demostrado que el vertido de hidrocarburos en el mar es algo habitual más que accidental. Este es un hecho preocupante dado el impacto medioambiental que suponen estos vertidos. Durante los años 1996-1998, se han analizado sistemáticamente tres zonas costeras europeas, dentro del proyecto CLEAN SEAS presentado en Gade y Redondo (1999).

Los resultados constatan, de forma incuestionable, que el área y volumen de los vertidos detectados, de forma rutinaria entre 1 y 100 Km², es casi un orden de magnitud superior al promedio anual de todos los accidentes con volúmenes derramados de crudo entre 10.000 y 200.000 toneladas. La detección de manchas de petróleo mediante SAR sigue de forma clara las rutas habituales de tráfico marítimo.

7.2.1 Identificación de manchas y advección

Los derrames de crudo de barcos son fuentes puntuales en movimiento que producen manchas con dos características:

- Son manchas longitudinales, con un eje de intensidad máxima.
- Una tendencia de aumento de su anchura y la disminución total de la intensidad por su difusión.

En la figura 7.17 se pueden observar claramente dos manchas de petróleo, la inferior corresponde a la estela reciente de un barco en ruta, mientras que la superior está más desarrollada, es más vieja. Esta nitidez de la imagen es posible debido a que sopla un viento uniforme en todo el dominio.

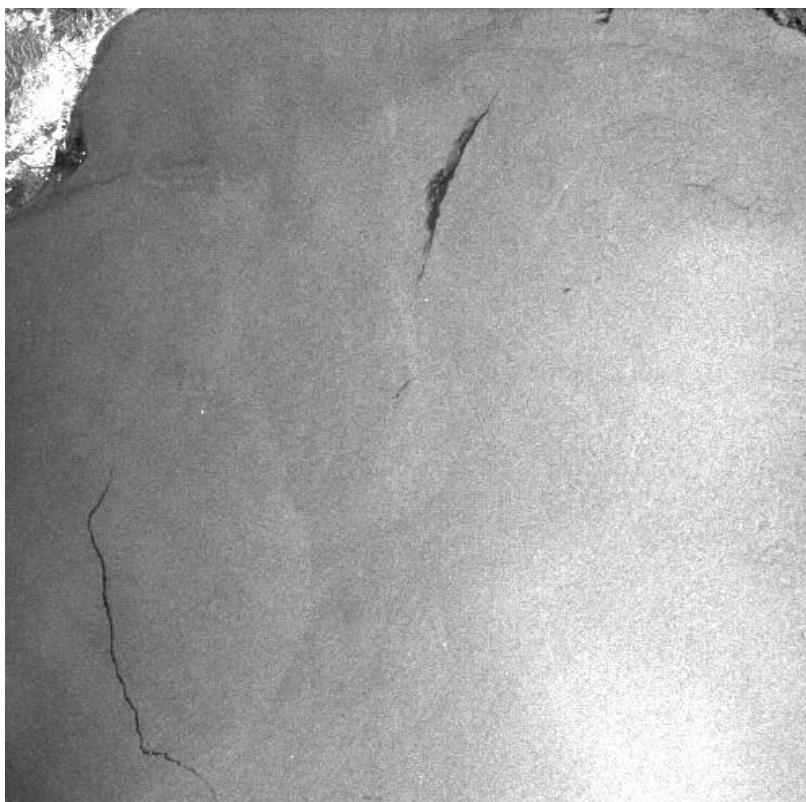


Figura 7-17. Manchas bajo un viento uniforme.

En otros casos hay frentes atmosféricos como los de la figura 7.18 que delimitan áreas con distintas tonalidades. Las partes más claras corresponden a zonas donde sopla el viento con más intensidad. Se puede observar como en su cabecera se acumulan manchas correspondientes probablemente a masas flotantes arrastradas por el viento.

Los procesos oceánicos también se pueden detectar en las imágenes SAR, pues arrastran masas flotantes de origen piogénico como algas o plancton, que actúan como trazadores pasivos que mantienen unas características espectrales similares a las del campo de temperatura o velocidad de la corriente (Seuront et al., 1996). Su origen no suele ser puntual, sino más bien difuso y extenso. Se presentan en “blooms” o masas que tienen la misma anchura a lo largo de su longitud.

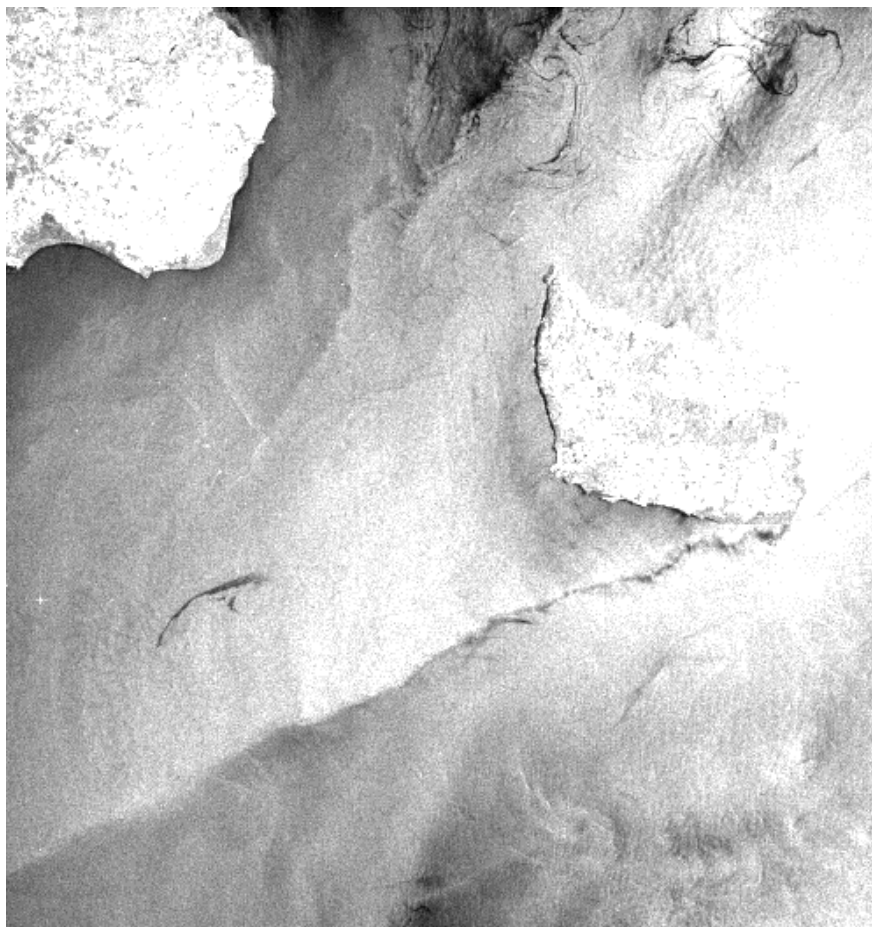


Figura 7-18. Frentes atmosféricos.

En la figura 7.19 se puede observar claramente un gran remolino de corrientes oceánicas, según la teoría de Kraichnam de la turbulencia bidimensional, característica de las grandes escalas del orden del radio de deformación de Rossby en el océano.

Los grandes remolinos cuando se desestabilizan transfieren su enstrofia (cuadrado de la vorticidad) a escalas menores. Al mismo tiempo, también se produce una cascada inversa de energía, con uniones de remolinos o vórtices bidimensionales. Las características de la dispersión de contaminantes superficiales dependen de la distribución espectral de la energía entre los remolinos de distinto tamaño. La auto-similitud de los procesos turbulentos en la superficie del océano permite el análisis fractal de las características geométricas de las imágenes SAR. En la figura 7.20 se pueden apreciar estos efectos, con una distribución de grandes remolino interaccionando con otros muchos de menor tamaño.



Figura 7-19. Las masas flotantes reflejan la presencia de los grandes remolinos.

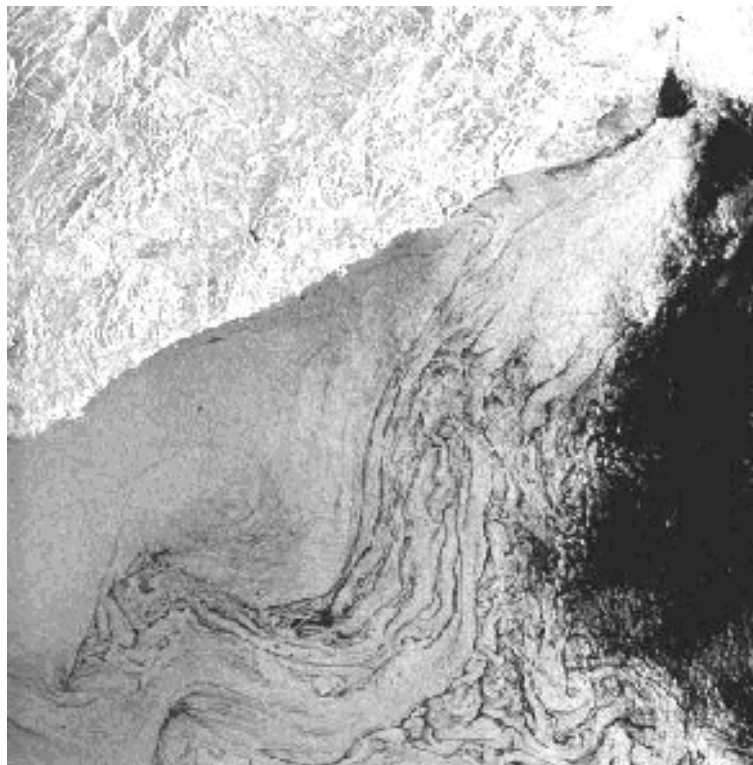


Figura 7-20. Distribución espectral de la turbulencia en remolinos de distintas escalas.

7.2.2 Contaminación marina

Se han analizado las siguientes imágenes obtenidas de diversos proyectos *Clean Seas* de la agencia espacial europea ESA:

- 330 imágenes del área del Mediterráneo Noroccidental de los años 1996 – 1998 del SAR obtenidas de los proyectos C1P.2240: Marine Pollution and surface dynamics in the NW Mediterranean Sea: monitoring, analysis and applications to environmental protection and control of hazardous oil spills and the river plumes.
- 200 imágenes del Báltico de las cuales 142 detectaron vertidos de petróleo con un área total de 522 Km². Project ENV4-CT96-0334.
- 196 imágenes SAR del mar del Norte, de las cuales 127 detectaron contaminación en un área de 72 Km² Project ENV4-CT96-0334.

Los resultados (publicados en Díez et al (2006) *Lecures in Enviromental Turbulence*) permiten llegar a las siguientes conclusiones generales:

- En alta mar se observan las rutas marítimas habituales de los petroleros debido a las manchas y estelas de petróleo, aceites y/o sustancias petroquímicas parecidas por sus propiedades tensioactivas, que aparecen como vertidos oscuros en las imágenes del SAR.
- El área total de todos los vertidos detectados en dicho período es de 1.521 Km², unas 407 tn. Esto indica claramente que la contribución de estos pequeños derrames no es despreciable. Los derrames pequeños “habituales” en alta mar no tienen menos importancia que la de los grandes accidentes, ya que su masa total vertida es incluso bastante mayor.

A partir del análisis fractal se pudo realizar un mapa de difusividad de la zona como se muestra en la figura 7.21.

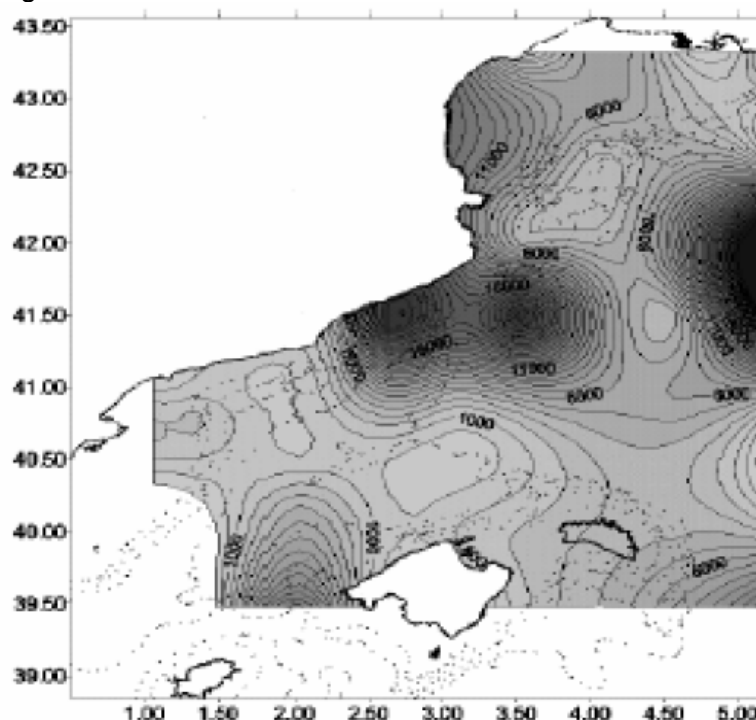


Figura 7-21. Mapa de difusividad en el Mediterráneo NW. Proyecto Clean Seas

7.2.3 Resultados de Vorticidad

Para detectar los vórtices y las escalas asociadas a los movimientos superficiales en el mar, fueron analizadas las imágenes de las cinco zonas mostradas de los años 1997-1998. La figura 7.22 muestra la probabilidad (número normalizado por las observaciones efectuadas) de la detección visual de estructuras en forma de vórtices registrados en los cuadrantes de 5' x 5'. Se ve bien que la mayor densidad de vórtices se observa al Este de Barcelona en el área cercana al cañón submarino de Blanes. Otras áreas con concentración relativamente alta de vórtices y están hacia el Sudeste y Sudoeste de Barcelona y al Sur y Sur – Sudeste de Tarragona, al Oeste-Noroeste de las Islas Baleares.

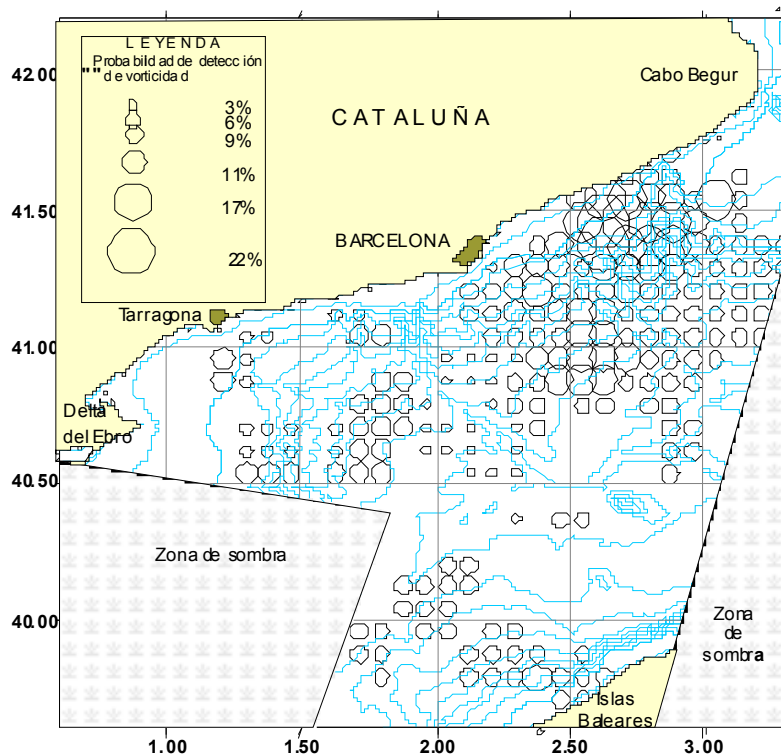


Figura 7-22. Probabilidad de vorticidad del Mediterráneo

La forma y la orientación espacial de 56 remolinos elípticos detectados en las diferentes imágenes SAR durante el período de observaciones. Para visualizar mejor la estructura batimétrica del fondo marino, los “thalwegs” de los cañones submarinos han sido marcados con líneas verdes. La mayoría de los vórtices están situados en una franja marítima relativamente cercana a la costa continental (Figura 7.23). Se nota una correlación entre las posiciones espaciales de los remolinos y los cañones submarinos: la mayoría de los vórtices están situados al lado izquierdo de los cañones submarinos. La mayoría de los vórtices detectados tienen forma elíptica y ocupan un área menor de 100 km². Se nota una tendencia a la disminución de los tamaños de los remolinos desde el Nordeste hacia el Sudoeste, hecho que puede ser asociado a las inestabilidades generadas por los cañones submarinos.

La distribución espacial de los vórtices respecto a los ejes “thalwegs” de los cañones submarinos, según nuestras observaciones, muestra una considerable dependencia entre los remolinos que se encuentran predominantemente al lado izquierdo de los

ejes de cañones, vistos desde alta mar hacia la costa. Este fenómeno se considera como un resultado de los procesos de turbulencia bidimensional debido a la fuerte interacción entre la corriente costera predominante hacia el sudoeste y la influencia de la batimetría de cañones submarinos en la conservación de la vorticidad potencial (Zatsepin et al., 1996).

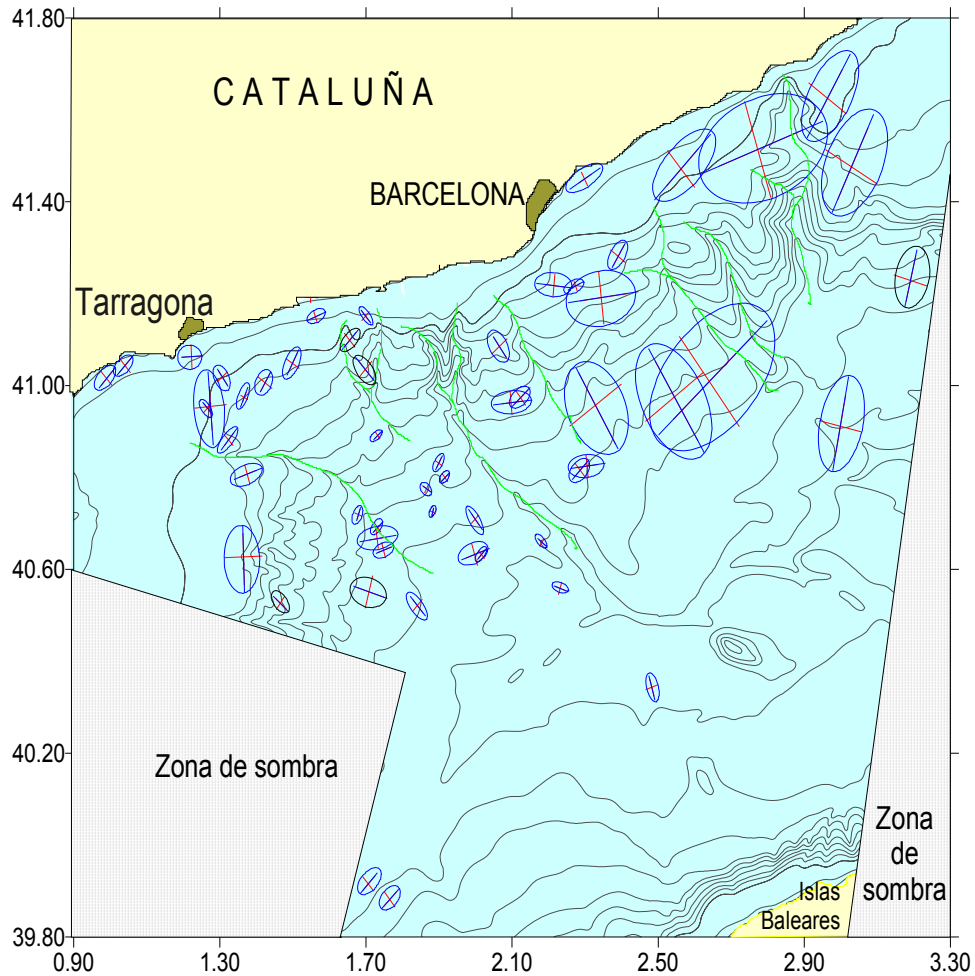


Figura 7-23. Proporción de los vórtices y las direcciones de sus ejes. Matulka 2009.

7.3 EVOLUCIÓN DEL OLEAJE EN ZONA DE ROMPIENTES

Aquí se presentan los resultados experimentales de transformación de la energía del oleaje mediante el análisis espectral de la zona de costa (NearShore), de rompientes (Surf Zone) y zona de orilla (Swash Zone), de la barra de Trabucador en el Delta del Ebro, publicados en Mosso et al. (1998).

En la propagación de la energía, el oleaje, al acercarse a la costa, se transforma aumentando la altura de ola y la pendiente (shoaling) hasta llegar a la ruptura, que produce una disipación y provoca una disminución de la altura de ola. La energía asociada se transforma y da lugar a distintos fenómenos físicos con distintas escalas hidrodinámicas (gradientes del tensor de radiación responsables del set-up, set-down, corrientes, corrientes de borde y transporte de sedimentos). Cierta cantidad de energía se transfiere a otras frecuencias, una parte a altas frecuencias en forma de turbulencia y otra a bajas frecuencias como ondas infragravitatorias o corrientes longitudinales.

En Delta 96 se hizo un estudio experimental para analizar esa transformación. Se estudió la evolución del espectro de energía cuando un tren de oleaje se propaga hacia la costa. En la zona de costa y de rompientes, los sensores de presión y correntímetros dieron buenos resultados, pero en la zona de orilla, tan solo las imágenes de vídeo resultaron eficaces.

7.3.1 Sensor de presión de altura de ola

Para transformar los datos del sensor de presión a altura de ola, primero debe hacerse un filtrado y después una conversión, (Bishop y Donelan, 1987). En el pre proceso se resta la media para eliminar tendencias como la marea y se filtra con una resolución de baja frecuencia de 0,008 Hz (60 s) y una alta frecuencia de (2 s) 0,5 Hz. El límite de la frecuencia de corte fue determinado por medio de un detallado análisis espectral de la serie de presión, que no mostró picos (oscilaciones) más allá de 32 segundos. A continuación se hace una conversión hidrodinámica basada en la teoría de ondas de pequeña amplitud:

$$\eta = n \cdot \eta_p \frac{\cosh(kh)}{\cosh k(h+z)} \quad \text{Ec. 7-1}$$

donde η es la fluctuación de la superficie de nivel medio del mar, η_p es la presión medida, k es el número de onda, h es la profundidad del agua, z es la posición del sensor cuando el eje vertical se toma con el origen sobre el nivel de agua y n es un factor de corrección.

En esos experimentos, una serie de sensores de presión y medidores de oleaje se encontraban a lo largo de la vara, algunos de ellos en la misma posición, lo que permite una comparación entre el oleaje obtenido de la serie de presión y el medido directamente con los sensores de oleaje. Se realizó la conversión de los sensores de presión a niveles de superficie libre con dos métodos; el Grace y el método MLFM (figura 7.24).

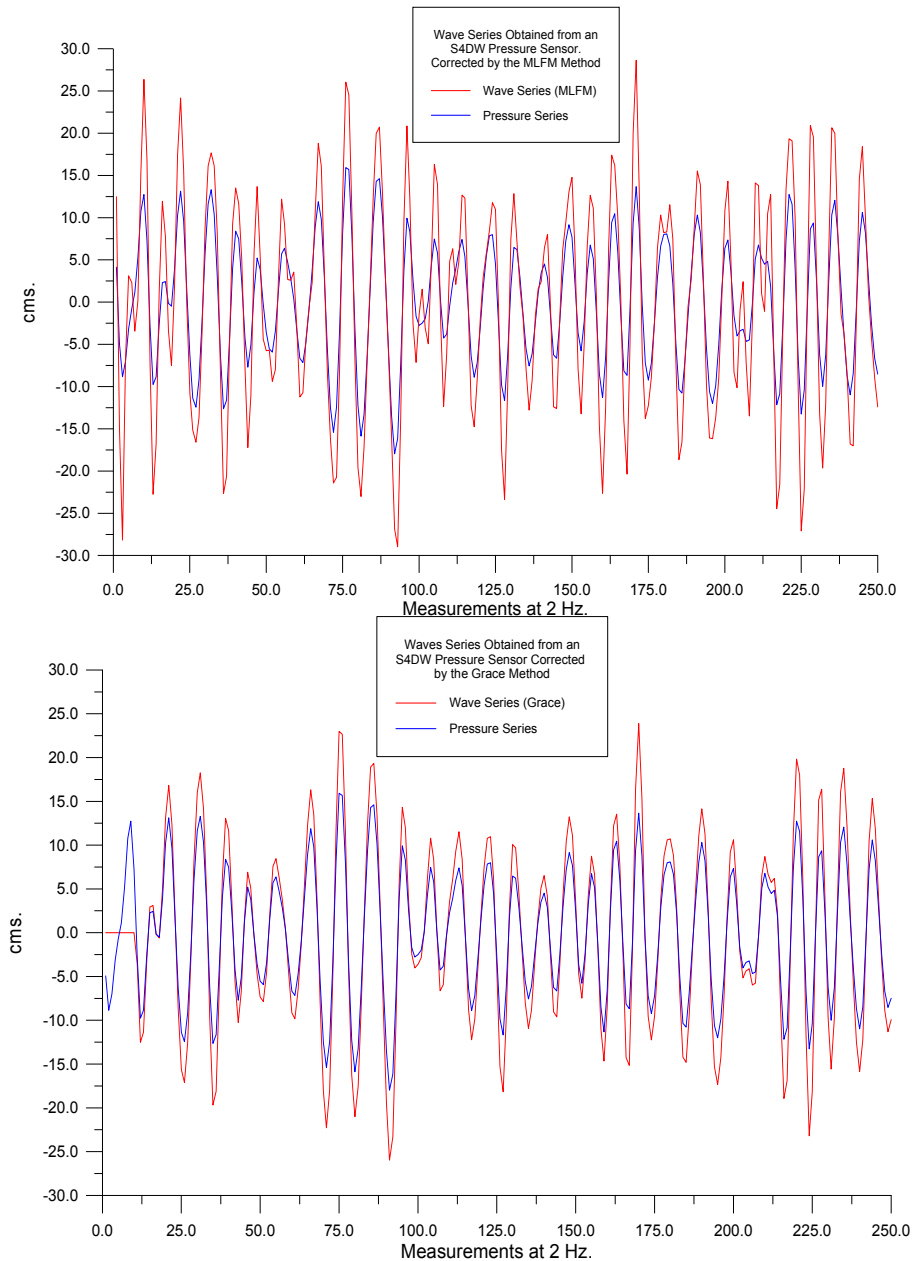


Figura 7-24. Oleaje de la serie de presión por el método MLFM (arriba) Grace (abajo).

Aunque los dos métodos dan buenos resultados y parámetros espectrales muy similares, el método de Grace se adapta mejor a la serie de tiempo de campo de onda medido que el método MLFM. El método MLFM es más sensible a cualquier cambio de dirección en las oscilaciones del agua de mar, dando, en algunos casos, olas mayores donde hay poco oleaje. El resultado de esto es que el espectro obtenido desde el método MLFM da algunos picos en frecuencias más altas, mientras que el método de Grace no lo hace (Figura 7.25).

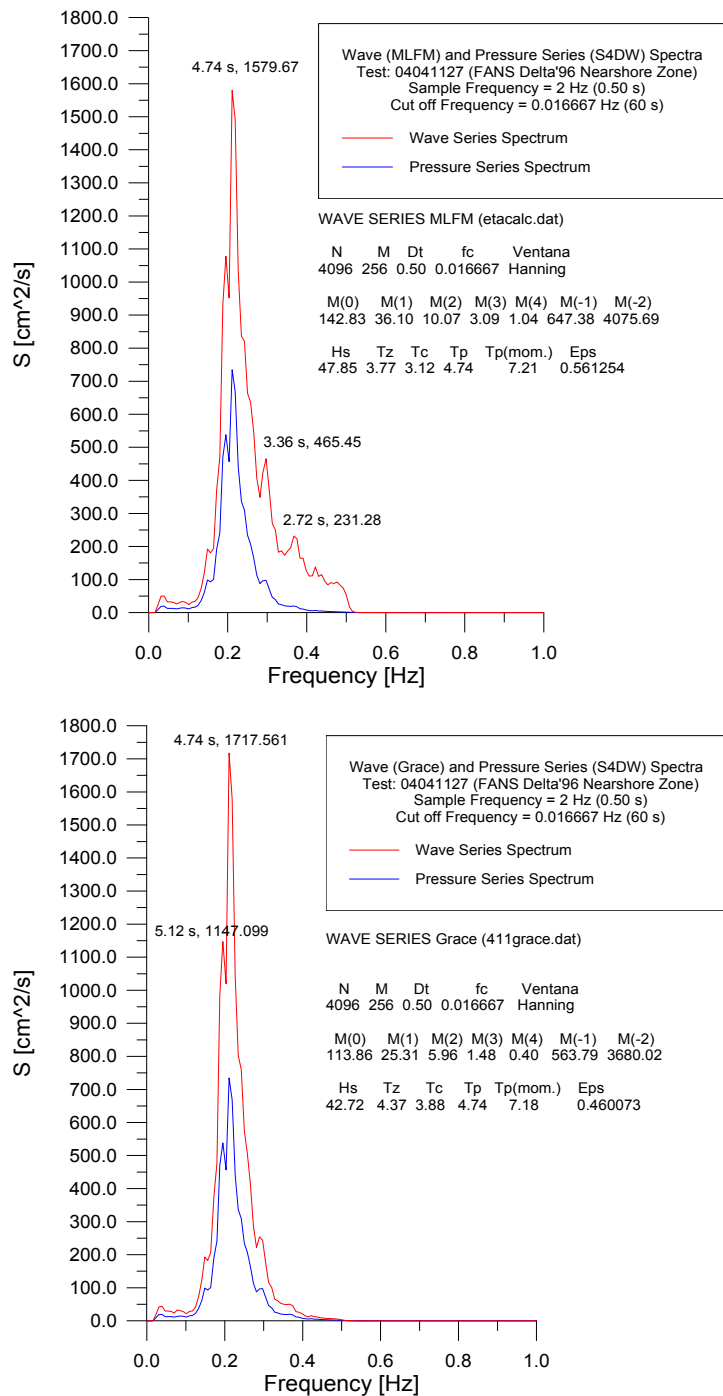


Figura 7-25. Espectro obtenido por el método MLFM (arriba) y por el de Grace (abajo).

7.3.2 Sensor de nivel

El sensor de nivel tiene una fila de pares de electrodos colocados en una varilla vertical a intervalos fijos (5 cm) y aislados unos de otros, que según estén sumergidos o no transmiten o no permitiendo identificar el nivel de la superficie libre. El espectro puede verse en la figura 7.26.

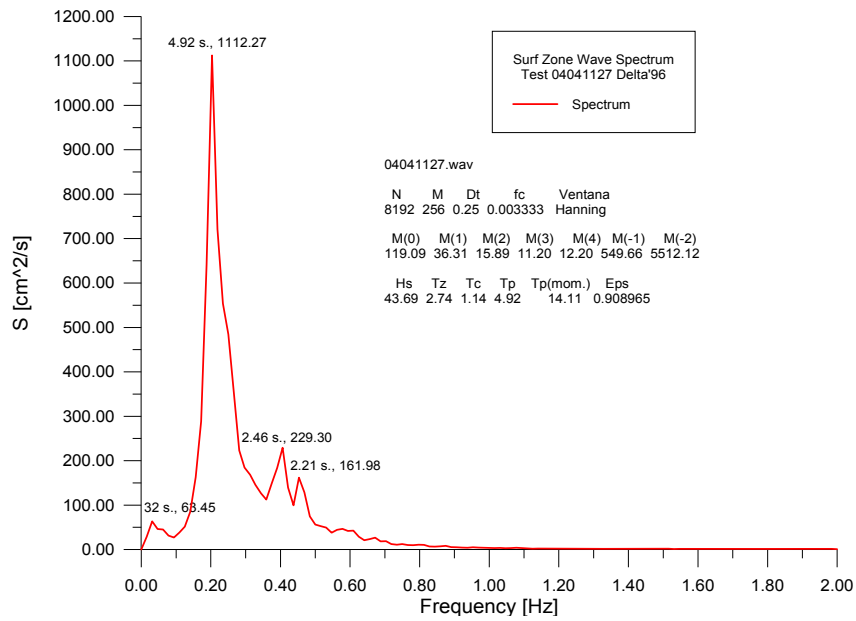


Figura 7-26. Espectros de energía durante la prueba 4 de 4/Nov./Delta96.

7.3.3 Análisis de imágenes

Usando técnicas de análisis de imágenes se puede analizar una ventana completa del campo de oleaje en el mismo momento para identificar variaciones topológicas en lugar, o bien se puede analizar la evolución temporal de un número relativamente pequeño de puntos. En virtud de la reflexión de la luz, se puede establecer una relación lineal entre la luminiscencia observada y la pendiente local de la superficie del mar. De la imagen resultante de la serie temporal de una línea (figura 7.27) se puede cuantificar el run-up/run-down.

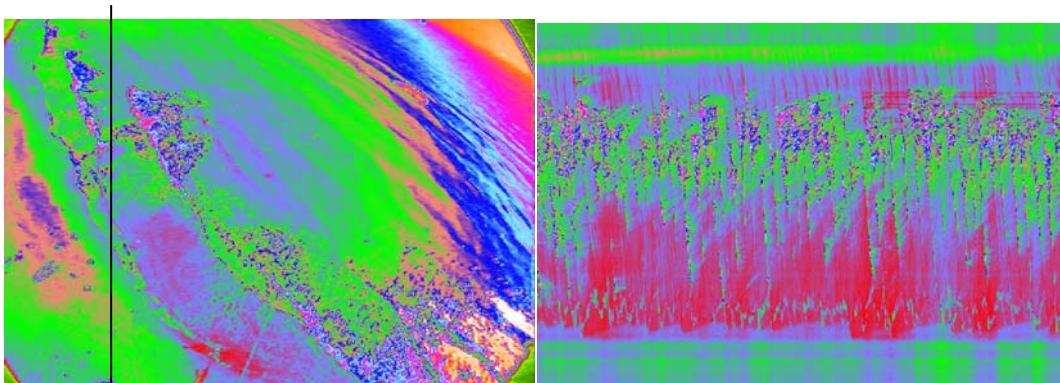


Figura 7-27. Serie de eje horizontal es el tiempo y la vertical es el perfil de playa.

A partir de las oscilaciones que se proyectan sobre la topografía se puede obtener una idea de sus alturas mediante una transformación de coordenadas (Diez et al., 1998). Si se aplica una transformada de Fourier a la serie temporal, se obtiene un espectro de la intensidad. Si se transforman las intensidades en altura de ola, se obtiene un espectro de energía del oleaje (figura 7.28).

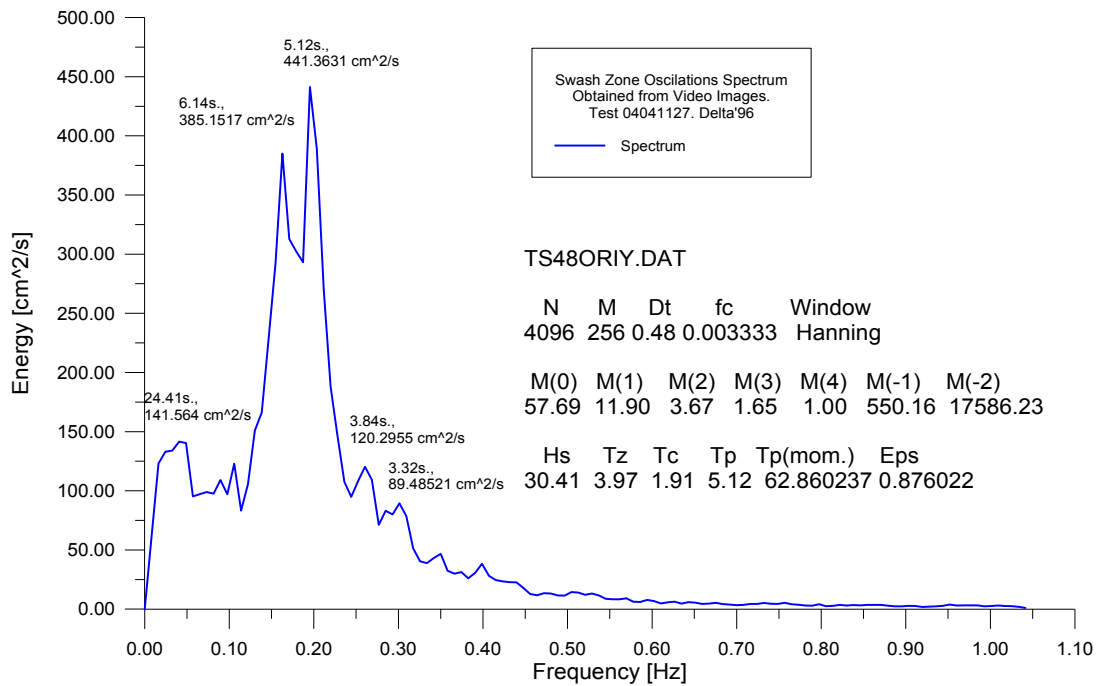


Figura 7-28. Análisis espectral a partir de imágenes de vídeo de la zona de swash

7.4 IDENTIFICACIÓN DE CORRIENTES.

En los experimentos de Delta 96 se identificó una corriente de retorno en la rotura de la barra de arena en la zona de rompientes, gracias al seguimiento de trazadores: boyas y manchas, que atravesaban la barra por el mismo tramo.

La cuantificación de las trayectorias y velocidades se realizó tomando una sucesión de imágenes completas, con un periodo de 10 segundos, durante unos 8 minutos (figura 7.29). Al principio, las boyas se hallaban agrupadas y resultaba difícil distinguirlas, pero a medida que transcurría el tiempo se iban separando, avanzando de forma ordenada, en fila india.

En cada una de las imágenes instantáneas se determinó la posición de las boyas visibles, grafica en la figura 7.30. Se puede observar que la intensidad máxima de la mancha y las boyas siguen un comportamiento distinto: la mancha es transportada longitudinalmente sin describir la celda de retorno que siguen las boyas. Ello se debe a que la trayectoria de la mancha describe el comportamiento euleriano, mientras que la de las boyas describe un comportamiento lagrangiano.

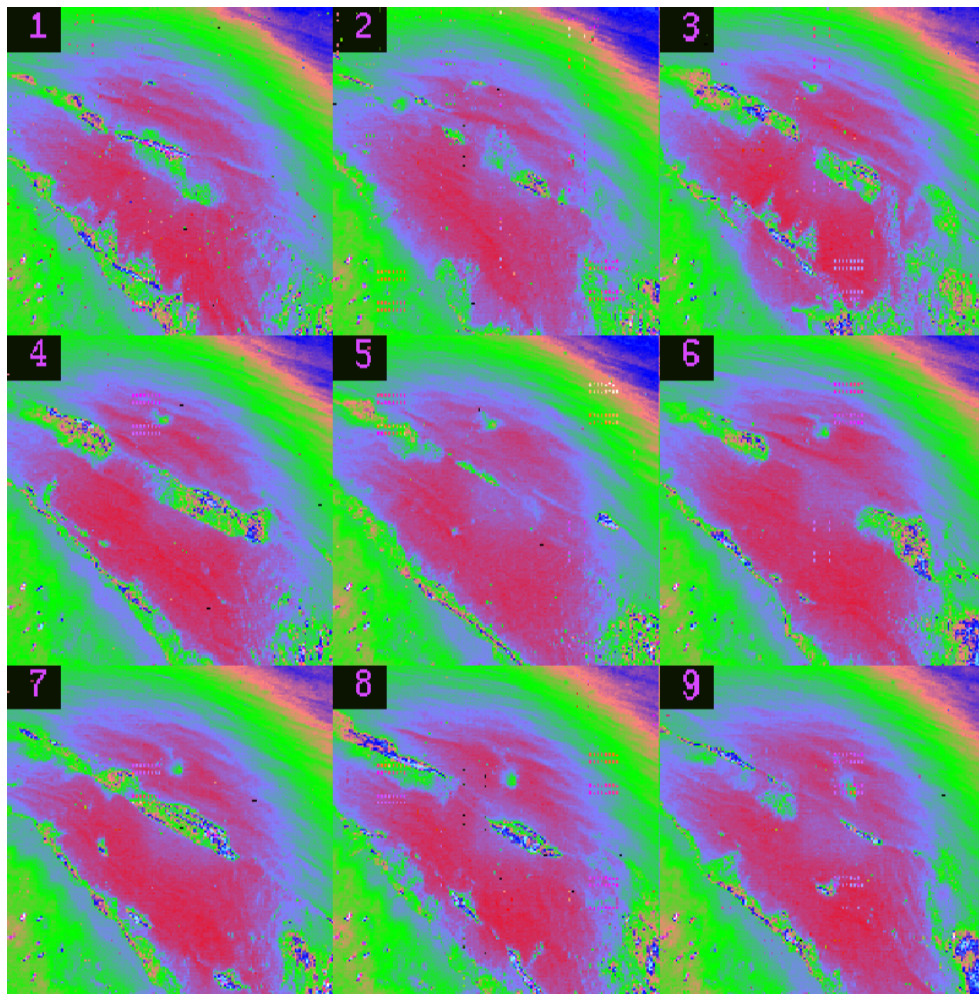


Figura 7-29. Secuencia de imágenes de la evolución de boyas y mancha.

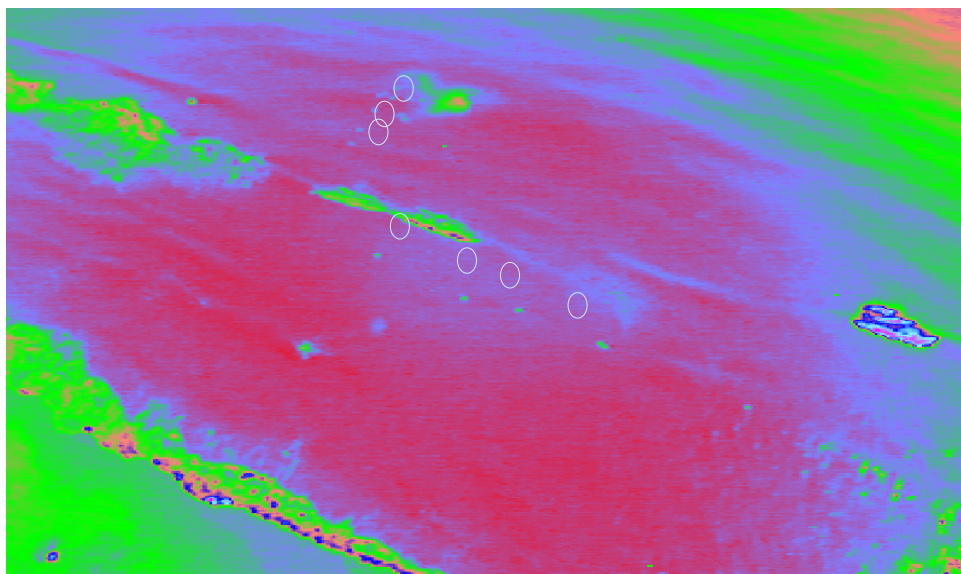


Figura 7-30. Mosaico de ventanas instantáneas de la evolución de la boyas.

En las figuras 7.31 y 7.32 se representan las componentes de la velocidad de una de las boyas en relación al tiempo. En la zona de rotura de la barra se dan velocidades transversales de hasta 70 cm/s, mientras que la corriente longitudinal era de unos 20 cm/s. Las condiciones meteorológicas no indican ningún agente impulsor que explique esta corriente transversal.

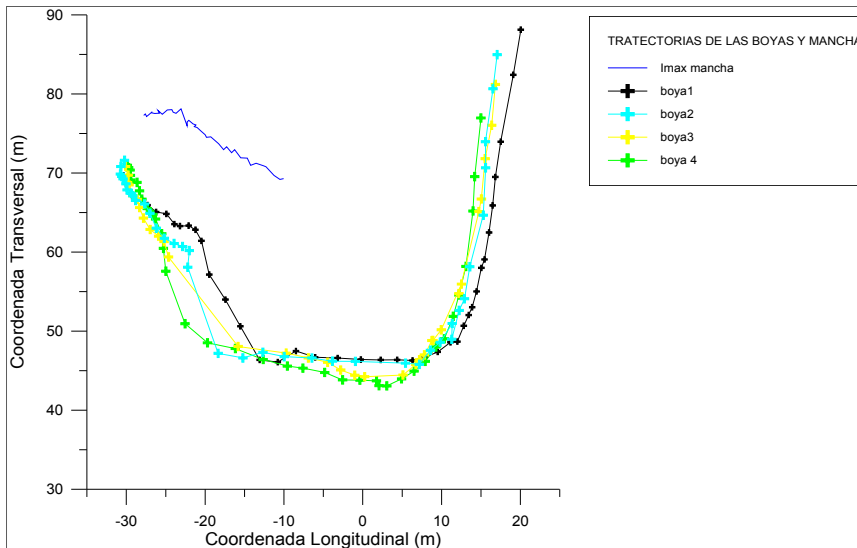


Figura 7-31. Trayectorias de las boyas.

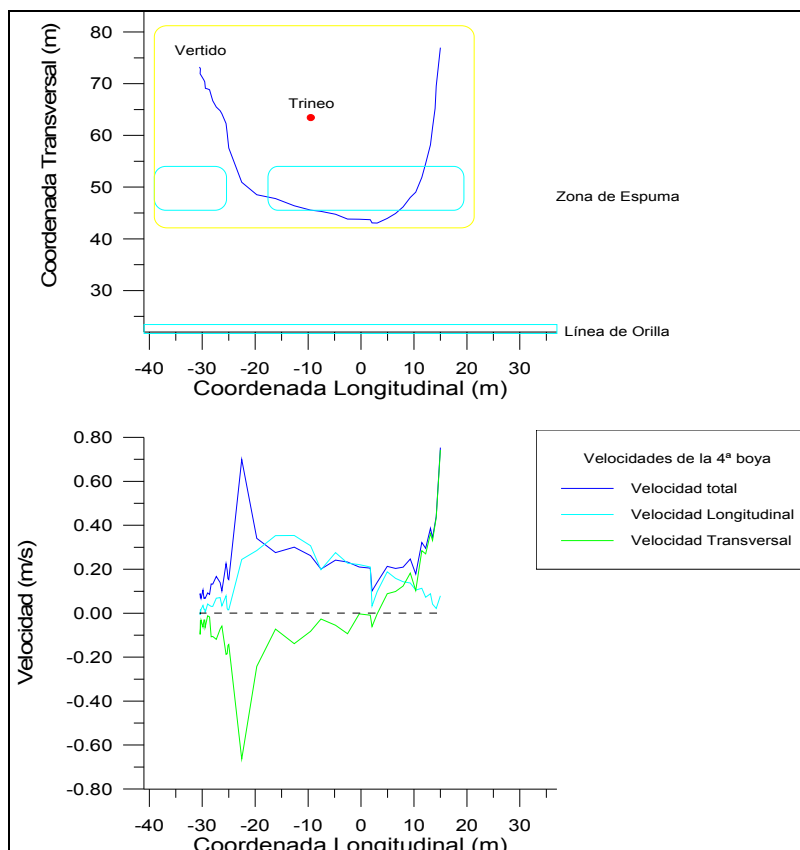


Figura 7-32. Velocidades de una boya.

Para identificar la corriente durante los experimentos de Delta 96 se vertió una mancha de forma lineal transversalmente a la orilla para ver como la deformaba la corriente y visualizar la celda que producía. Efectivamente, la mancha se deformó en forma de “U” describiendo la misma trayectoria que las boyas como se puede ver en la figura 7.32.

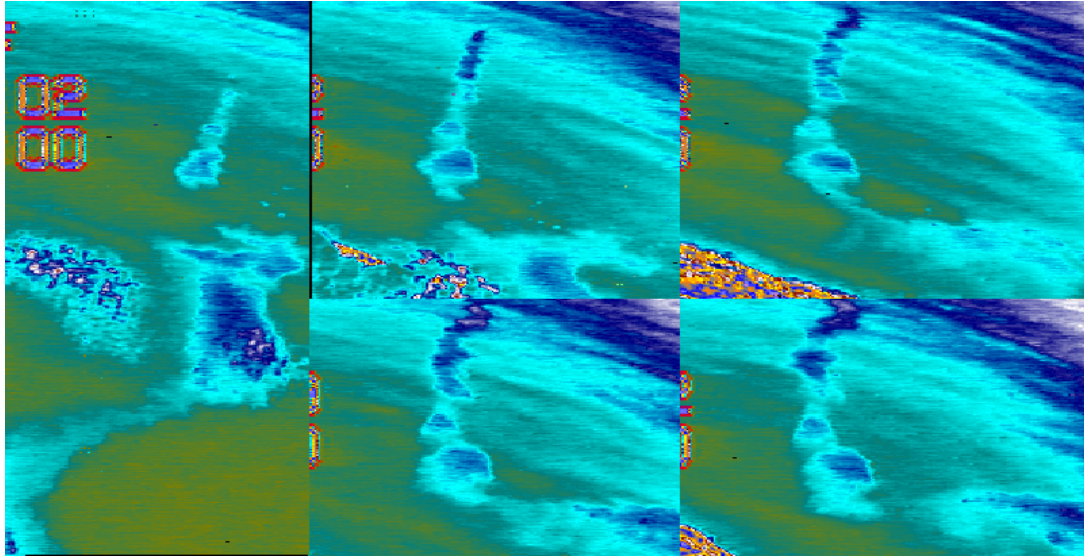


Figura 7-32. Deformación de una mancha lineal.

El análisis de las condiciones hidrodinámicas, a partir del espectro obtenido con las velocidades de los correntímetros del tetrápodo situado en la zona costera (Figura 7.33), indica que se trata de condiciones de muy baja energía, insuficientes para generar una corriente de hasta 70 cm/s, (Arthur, 1962).

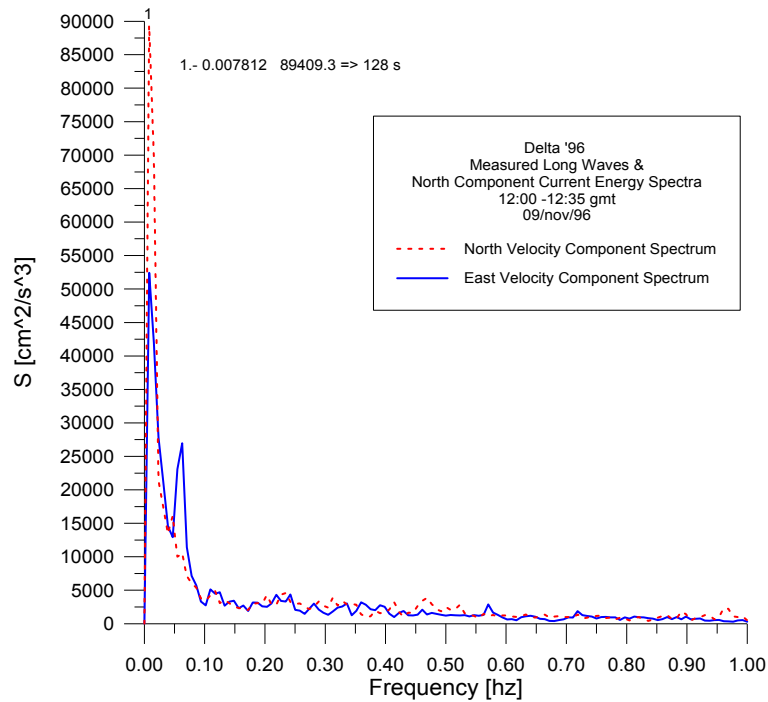


Figura 7-33. Espectro de velocidades en la zona costera.

7.5 OTRAS CARACTERIZACIONES MORFOLÓGICAS

Mediante imágenes de vídeo de la zona de rompientes (ZR), es posible estudiar distintas características del oleaje y la evolución que sufren éstas a medida que se acercan a la orilla. Entre las características más destacadas figuran:

La dirección de las crestas. A partir de unas imágenes de calidad (resolución y contraste) es fácil identificar las crestas del oleaje de tipo “sea” y “swell”. Con una función de transformación de coordenadas se puede controlar la evolución de la dirección del oleaje desde donde empieza a ser perceptible hasta la línea de orilla y en todo el ancho que abarque el dominio del campo visual. Haciendo una serie temporal de una columna de píxels correspondientes a una sección de la ZR, es posible identificar las olas y sus características; por ejemplo la pendiente de las olas a lo largo de la serie temporal representa su velocidad de avance. En la figura 7.34 se puede observar que se producen “Y” de olas atrapadas por otras más rápidas, debido a que tras la rotura se produce una dispersión frecuencial del oleaje.

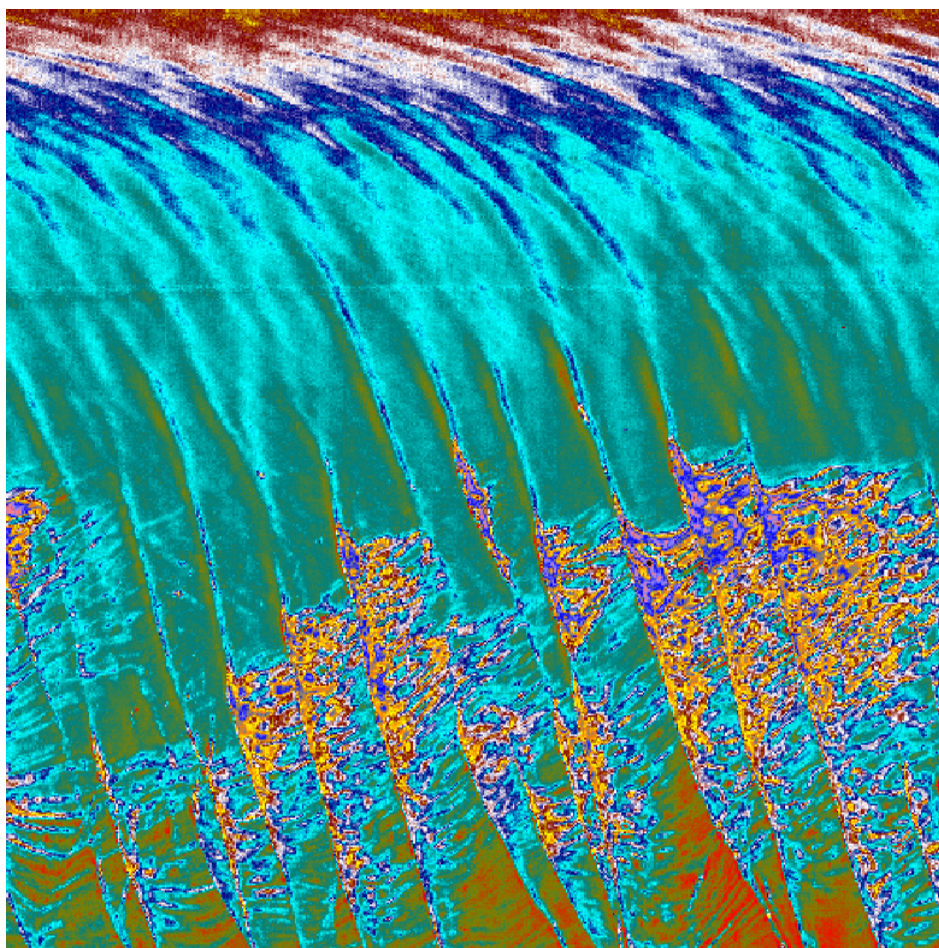


Figura 7-34. Serie temporal con olas atrapadas.

Determinar la posición de la orilla no es trivial. Para hacerlo exactamente, hay que digitalizar las posiciones de la espuma y transformar las posiciones a cotas. Gracias a la transformación de coordenadas y a la batimetría se puede cuantificar “setup+runup” de una serie temporal y es posible obtener el espectro de energía de esta zona. La diferencia entre la línea de orilla y la de rotura define el ancho de la zona de

rompientes, mientras que la distancia entre los mínimos y máximos de la línea de orilla se considera el ancho de la zona de swash.

Por otro lado, el oleaje al romper produce espuma, lo que supone un excelente trazador para el análisis digital de imágenes de vídeo. Realizando un promediado durante un número significativo de olas (figura 7.35), unos 10 minutos, se puede ver la distribución espacial de la espuma. Para calcular la fracción de olas rotas se debe pasar un filtro on/off que asigna un valor de 1 para intensidades superiores a un umbral a partir del cual se determina que hay espuma y 0 para los valores inferiores, donde no hay espuma. Así pues, el valor de la intensidad promediada en cada punto es una medida relativa del tiempo con espuma. Ponderando por el periodo del oleaje y el tiempo de exposición se deduce la fracción de olas rotas. Por lo tanto, además de controlar la propagación direccional del oleaje, un análisis de este tipo permite deducir información indirecta de la batimetría de la zona de rompientes (ZR) por irregularidades longitudinales.

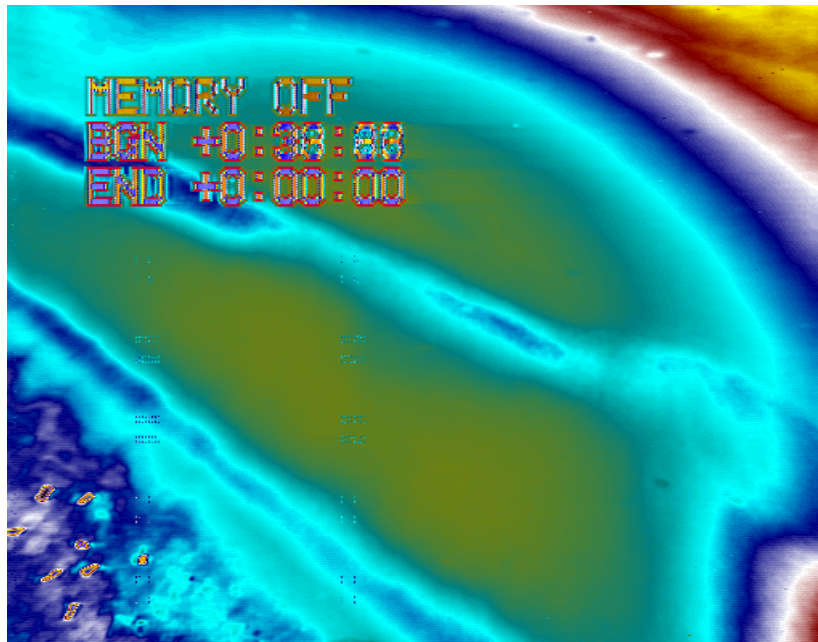


Figura 7-35. Promediado temporal de las imágenes digitalizadas durante 5 minutos.

Una vez caracterizado el oleaje medio con altura H , periodo T y celeridad c , el coeficiente de difusión K de la zona entre la orilla y la barra (a una distancia L usada como escala de longitud) se puede obtener en función de la velocidad de fricción del viento u_* , como:

$$\bar{K} = \frac{HL}{T} f\left(\frac{u_*}{c}\right) \quad \text{Ec 7.2}$$

7.6 MODELADO NUMÉRICO

La simulación numérica permite reproducir el comportamiento de un vertido si se conocen las condiciones ambientales (Viento, Corrientes, Oleaje, Temperatura, etc.) y las características del vertido (Viscosidad, Volatilidad, Densidad, etc...).

El análisis se puede hacer:

- A posteriori, calculando su punto de vertido y su antigüedad.
- A priori, prediciendo su trayectoria y dimensión para su confinamiento en caso de vertidos accidentales.

El modelo de dispersión LAD-3D (Mestreset al., 1998) está basado en una aproximación lagrangiana (conjunto de partículas) de la ecuación de convección-difusión en 3D. Interpretando esta expresión como una ecuación de Fokker-Planck, puede obtenerse una ecuación diferencial estocástica que es consistente con la ecuación de advección-difusión. La nueva ecuación se utiliza para desplazar un conjunto de partículas discretas que representan el contaminante, y cuya posición, transformada a distribución continua, da una imagen precisa del perfil de concentraciones resultante de la dispersión.

LAD_3D ha sido validado utilizando varios test sencillos y datos reales correspondientes a campañas de campo como los de Delta'96 en zona de rompientes, para comparar las trayectorias y velocidades de las boyas y la mancha y compararlos con los simulados por el programa. En la figura 7.36 se puede ver la superposición de los resultados obtenidos mediante la simulación numérica calibrada con los datos hidrodinámicos experimentales y los resultados del análisis digital de una serie de imágenes tomadas cada 10 segundos.

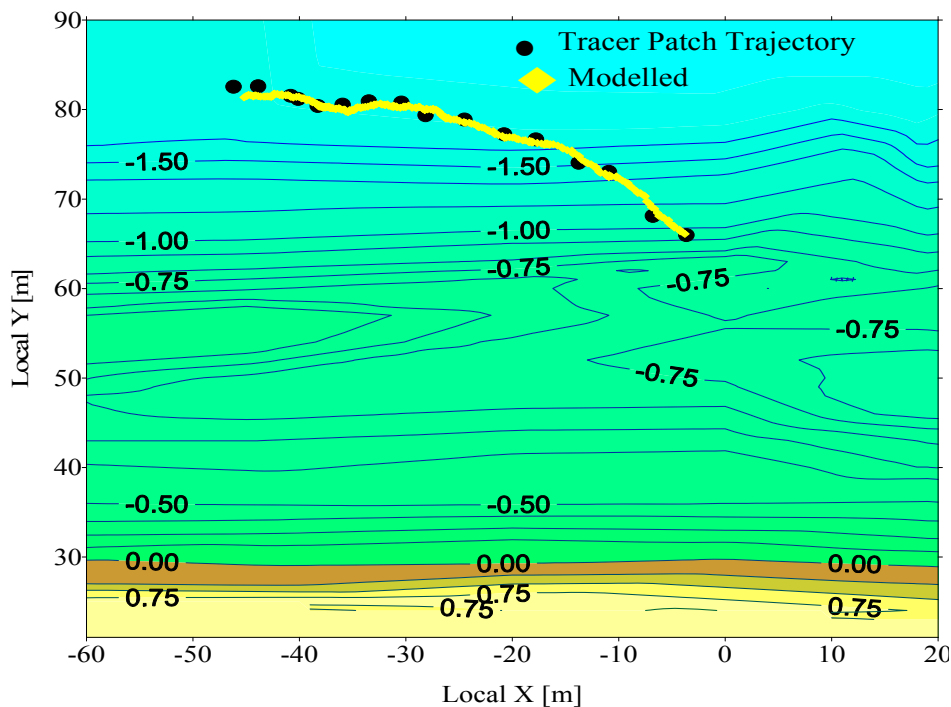


Figura 7-36. Comparación de las trayectorias en la simulación y las imágenes

En la figura 7.37 se compara la evolución del tamaño real y el modelado numéricamente con diferentes coeficientes. Se observa como el tamaño de la mancha es muy sensible a la determinación del coeficiente, especialmente para manchas desarrolladas. Por otro lado, en sentido transversal la variación no es tan notable. También se observa como a partir de los 350 seg el tamaño empieza a decrecer, ya que el grado de dilución alcanza el umbral de detección.

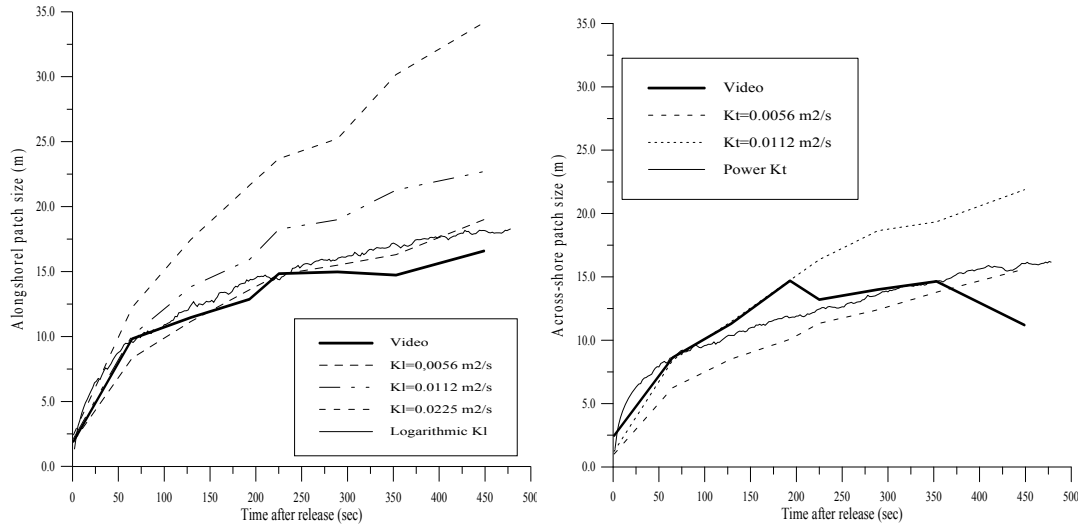


Figura 7-37. Comparación entre el tamaño de una mancha en Delta 96 y la simulación numérica con diferentes coeficientes de difusión en dirección longitudinal y transversal

En cuanto a la trayectoria seguida por la mancha, la simulación numérica, da un buen resultado, con diferencias inferiores al metro (figura 7.38).

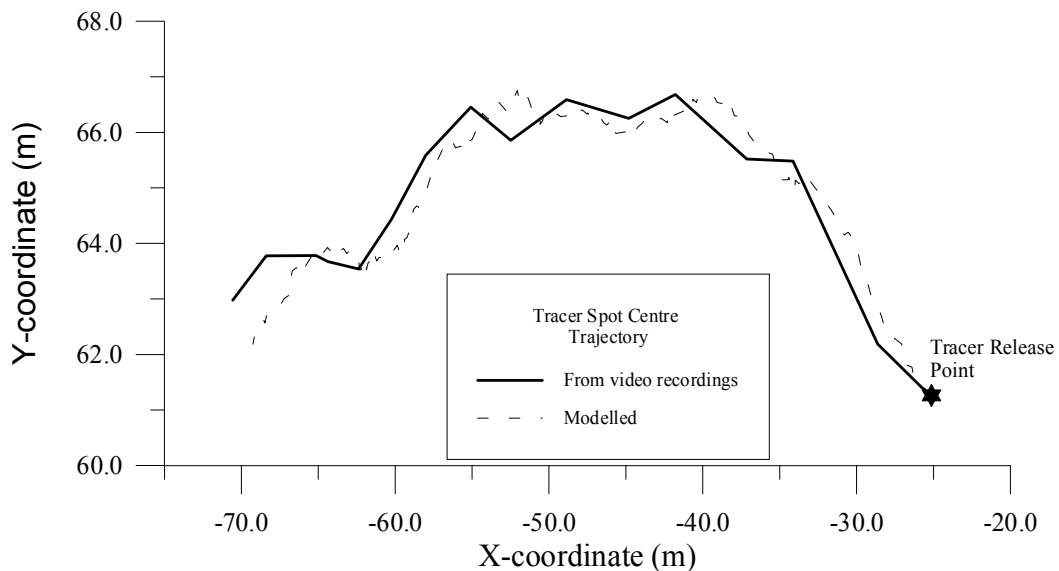


Figura 7-38. Trayectoria del centro del trazador modelado con 20,000 partículas, cada 2s

Otro modelo de simulación diseñado especialmente para vertidos de hidrocarburo es SPILLSIM. El modelo se basa en una simulación cinemática de la turbulencia (Castilla 2001) con modificaciones específicas para simular el campo de turbulencia en la superficie del océano tanto en el dominio bidimensional de cascada inversa de la energía como en la región a escala más pequeña donde dominan los aspectos de difusión y mezcla por turbulencia tridimensional.

El modelo de simulación cinemática utilizada se describe en Castilla (2000, 2001) y es similar a la simulación utilizada por Fung et al. (1992) y Malik et al. (1993,1999). Se puede aplicar este modelo directamente a los derrames de crudo al mar para relacionar el crecimiento de la dimensión fractal máxima de un derrame en el tiempo durante su tiempo de residencia (Redondo et al. 2008 y 2009).

La comprensión de las propiedades de transporte y la mezcla de contaminantes pasivos, o en general de los trazadores en los flujos de líquido es de gran importancia práctica en diversos campos de las ciencias ambientales e ingeniería. El método de rastreo de partículas o seguimiento de boyas en el océano, durante su movimiento contenido en el dominio de medida o volumen capaz de devolver un conjunto útil de medidas de velocidad Lagrangianas están asociadas con el flujo de partículas en lugar de limitarse a su situación, es decir, en coordenadas Lagrangianas. La dispersión de los contaminantes es un ejemplo de un fenómeno natural que se describe de forma Lagrangiana. De hecho, los contaminantes actúan como marcadores de partículas de un fluido, por lo que una vez que son liberados avanzan en el campo como un escalar y se puede seguir de una manera pasiva el campo de velocidades, y analizar su escala espacial.

El software básico está programado en FORTRAN Standard para Unix/Linux con salidas gráficas están en formato gráfico .GIF. Está adaptado a las entradas y salidas del modelo DIFUSOIL – SPILLSIM y distintos modelos ajustando tanto el mapa de velocidades promedio, condiciones de contorno y niveles de turbulencia ambiental a partir de diversas generación de mallas de velocidad y de difusividades turbulentas a partir de datos reales o predicciones (HIRLAM, WAVE, etc.)

La precisión del modelo depende de la calidad de los datos para inicializar los campos de velocidad superficial y de difusión en función de las escalas a parametrizar, se considera apropiado un mínimo de 10 vectores en el campo de 50 Km x 50 Km utilizado.

El modelo de predicción de corrientes es de advección difusión tipo euleriano, forzado por el viento. Para poder definir el campo instantáneo de velocidades y su evolución en el tiempo es necesario utilizar una predicción numérica adecuada a la escala y a la zona de estudio y un sistema de asimilación de datos reales, sobre todo en las predicciones.

El modelo óptimo en el caso de una buena descripción inicial del campo de corrientes superficiales marinas es el obtenido a partir de la ecuación de la vorticidad de los vórtices a mesoescala (del orden del Radio de deformación de Rossby Rd según se describe en Carrillo et. al. (2004). El espectro de energía utilizado es el de la figura 7.39

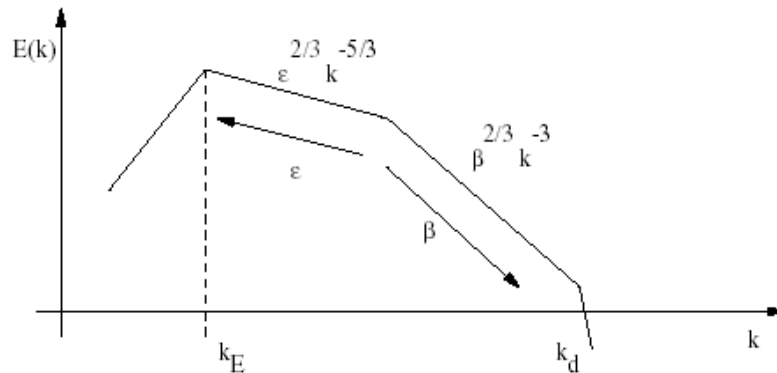


Figura 7.39 espectro de energía

Posibles aplicaciones futuras al modelo de simulación, la depuración y aumento del rendimiento operativo mediante de un zoom en la malla de calculo inicial (50x50 Km) y diversas subrutinas adicionales que permitan condiciones iniciales de la mancha de petróleo de cualquier forma (no solo elípticas). Además existen una serie de condicionantes locales, batimetría, mapas de viento y su evolución, fase de la marea, corrientes significativas a distinta profundidad, etc., que serian importantes a pequeña escala y deberían implementarse.

Un ejemplo de la evolución de una mancha de crudo se ve claramente en la visualización gráfica de imágenes (figura 7.40). Se trata de una mancha alargada que se desplaza unos 3-4 Km en 12 horas con una corriente de 5 a 22 cm/s alargándose y distorsionándose poco a poco. (Redondo et al 2009)



Figura 7-40. Modelado numérico (spillsim) de la Deformación de un derrame de crudo real.

Los valores de dimension fractal maxima o de complejidad de la forma de la mancha de crudo pueden compararse con los valores maximos de la distribución multifractal de ejemplos reales, tal como se realizo por primera vez en Gade y Redondo(1999) ver ejemplo en la figura 7.41.

Los cambios del área del vertido hipotético y de su forma son notables, siendo este una estimación a la alza ya que no se modela la degradación del crudo. La difusividad turbulenta superficial es anisotropita pero se puede estimar de forma global a partir de la variación del área del orden de 50 - 300 m²/s para derrames de tamaño de unas decenas de kilómetros. Las relaciones entre aspectos geométricos, detectables por ordenador y las características medioambientales locales mostradas en las figuras 7.41 permiten una mejor evaluación y análisis de los vertidos reales detectados mediante SAR, así como mejorar los procesos de asimilación de datos en las predicciones de vertidos accidentales (Tarquis et al 2011, Redondo et al 2009)

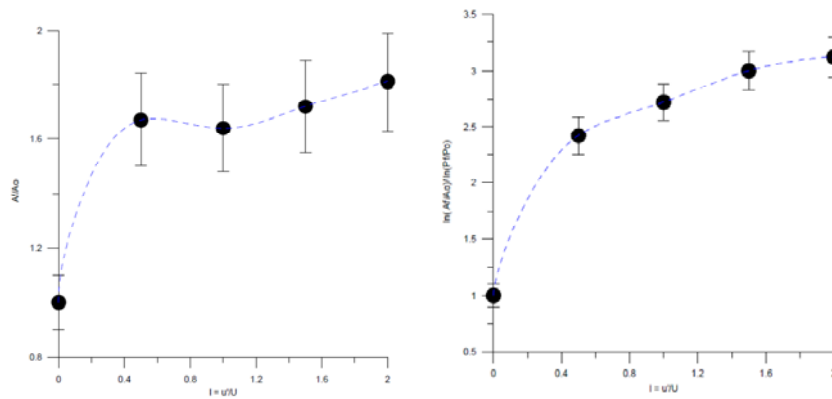


Figura 7.41 Ejemplos de evolución de dimension fractal de Redondo et al (2008) y Tarquis et al. (2011)

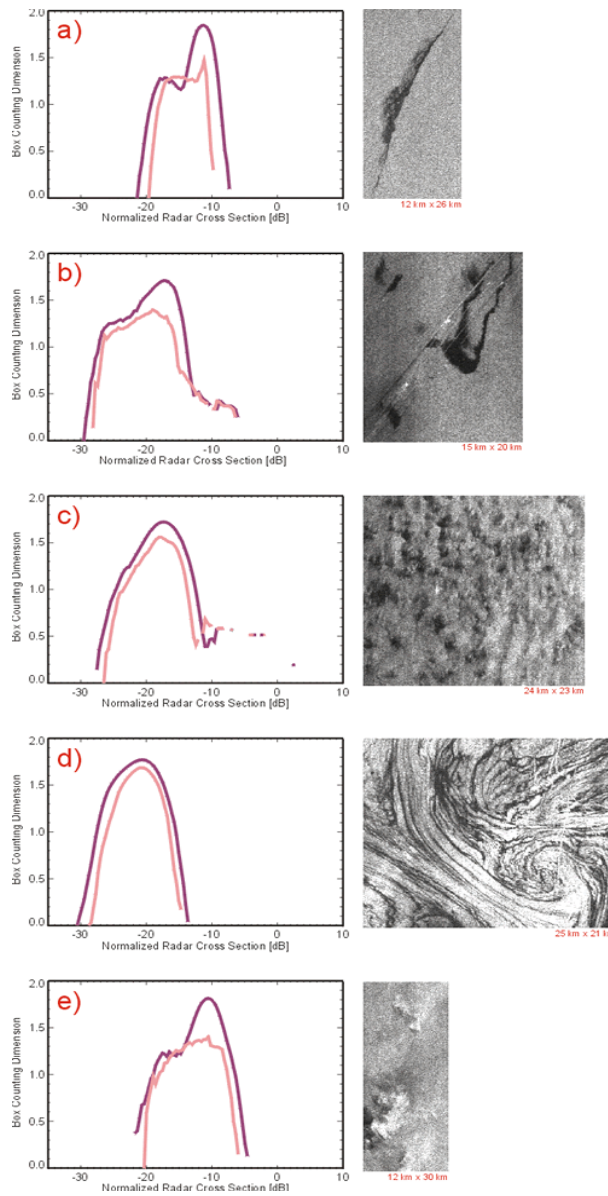


Figura 7.42. Ejemplos de distintas distribuciones de dimensiones fractales para manchas de petroleo y otras características superficiales en imagenes SAR (Gade y Redondo 1999)

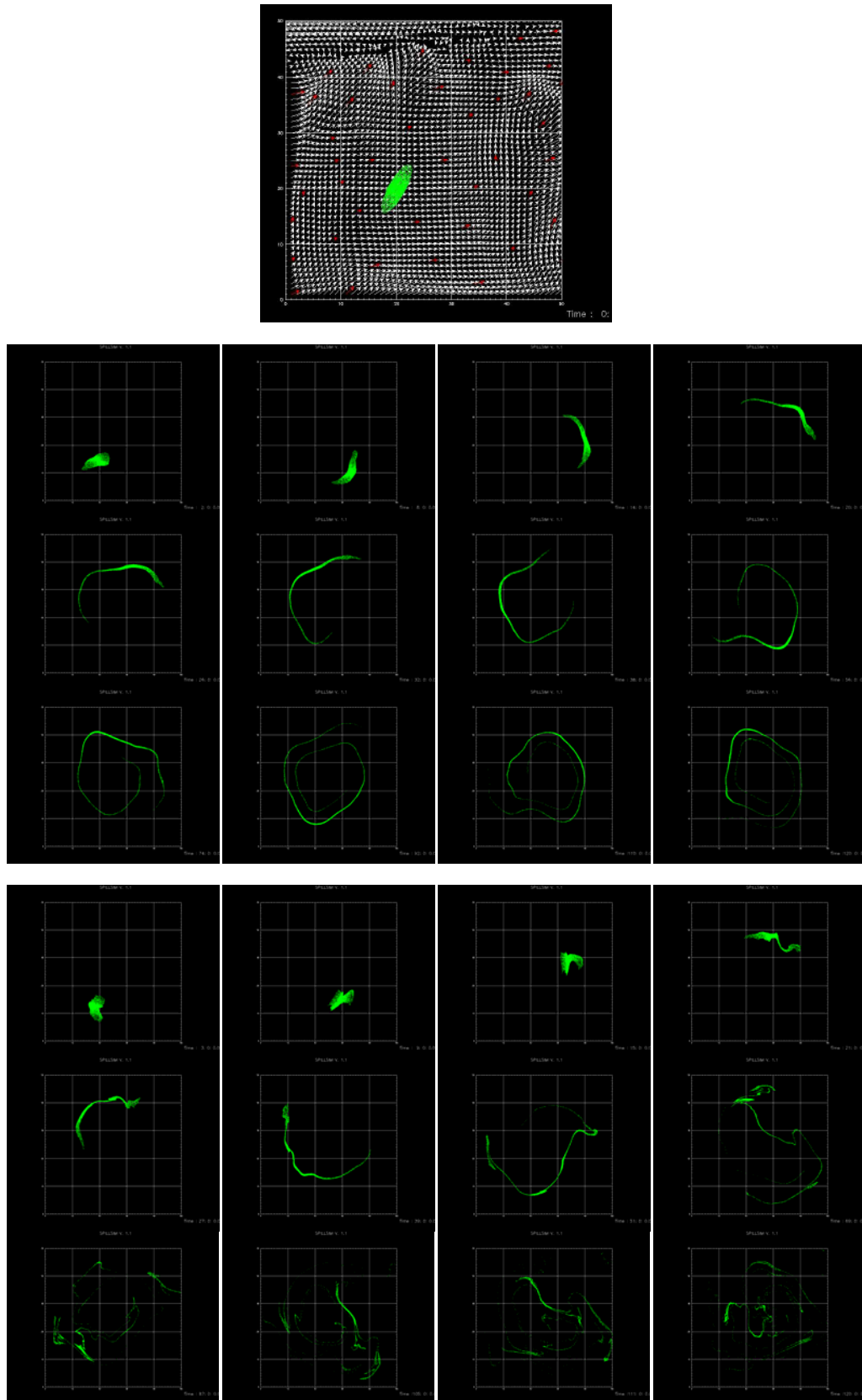


Figura 7.43 secuencia de deformación de una mancha de origen natural (arriba) y de un vertido de crudo (abajo).

En las figuras anteriores, podemos observar la diferencia de las características topológicas de sliks naturales y de derrames de petróleo. Las técnicas avanzadas de visualización de flujos permiten la identificación de vórtices o de células de Langmuir. Los diferentes orígenes de las manchas se reflejan en su topología y por tanto en su dimensión fractal $D(r)$ Gade y Redondo (1999). Otros parámetros multifractales pueden estar relacionados con los mecanismos físicos que afectan a la intensidad de un escalar en la identificación de flujos, como en Castilla (2000) y Redondo (1990), donde se muestra que la estratificación está afectada por la máxima dimensión fractal.

Las correlaciones de los valores de intensidad y la integral radial de estos L , indican la escala espacial donde las intensidades SAR se correlacionan bien. Si suponemos que las corrientes superficiales son responsables (al menos en parte) de la distribución espacial de la rugosidad del océano por dos razones principales: primero, la pendiente a ambos lados de un remolino es muy diferente a la producción de retrodispersión de radar de un lado (como sucede con ERS-1 / 2 y ENVISAT y RADARSAT), esta escala de longitud de los flujos del medio ambiente está estrechamente relacionado con el radio de deformación de Rossby (Platonov y otros, 2008, 2009), y puede ser utilizado para evaluar la difusividad.

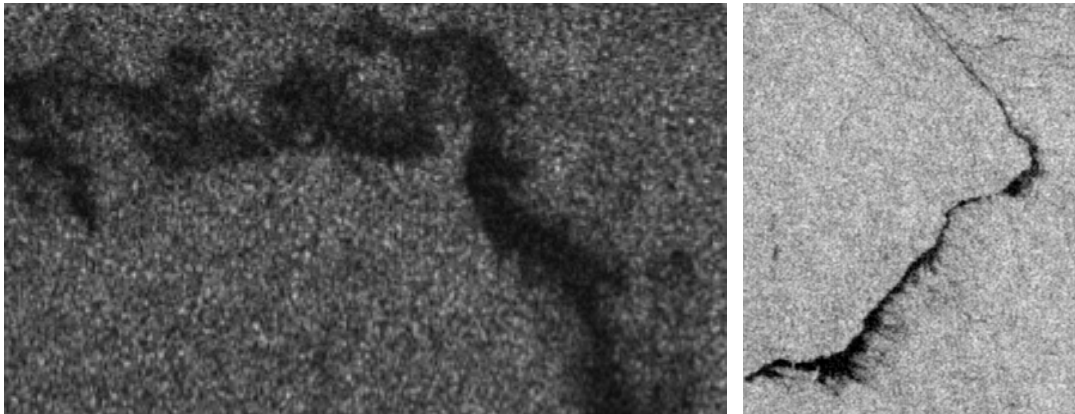


Figura 7.44. Imágenes SAR de alta resolución con vertidos de crudo.

Por ejemplo, el vertido de crudo en la izquierda de la figura 7.44, en una resolución más alta con ASAR correspondería a una serie temporal no-dimensional T_{oil} entre 0,7 y 0,8 correspondiente a la dimensión fractal de 1,3 a 1,4. Hay otros indicios que pueden ser útiles a partir de las observaciones SAR, tales como el viento local suave en el momento que se tomó la imagen. No hay un patrón consistente que distinga a los vertidos recientes de crudo y de las manchas de flotantes naturales que se han adaptado al flujo turbulento multi-escala de la superficie del océano.

La figura 7.45 es similar a la última imagen de la figura 7.43, pero la intensidad turbulenta local es mayor, (con una firma espectral que se muestra en la figura 7.40) por lo que se ve fácilmente que la convolución son mayores y la dimensión fractal es mayor. En la figura 7.44 (derecha) se ve una imagen (15 Km x 21 Km) del SAR del ERS-1 del 24 de Agosto de 1997 de un área en la parte Occidental del Mar Balear. El derrame ya está transformado mediante las corrientes y otros fenómenos hidrometeorológicos locales y ya lleva tiempo en el medio marino. El borde más oscuro e intenso de la mancha indica su desplazamiento hacia Noroeste bajo la acción del viento moderado desde Sudeste.

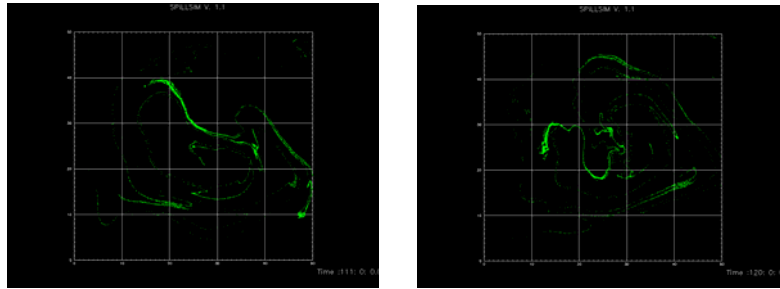


Figura 7.45. KS simulation de dispersion en un medio turbulento

Las observaciones experimentales de las características se han analizado con técnicas fractales multi-escala para extraer información relevante sobre las características espectrales de la mezcla y difusión. Tanto la densidad como la concentración de trazadores o vertidos de crudo pueden ser investigados en detalle usando la función de estructura de tercer orden, lo que indica una fuerte cascada inversa hacia la gran escala produciendo variaciones espectrales, la influencia del tipo de cascada turbulenta (2D o 3D) y de la influencia de la intermitencia en el espectro de energía y en la descripción de los coeficientes de difusión se describen de forma teórica en la discusión de esta tesis y en el apéndice 1.

Analizando modelos con distinto nivel de intermitencia y de espectros entre $5/3$ y 3 se comprueba que la complejidad y la dimensión fractal de la mancha de crudo aumenta en el tiempo hasta estabilizarse en una dimensión fractal definida en el plano $D_2=1,4-1,6$. Cuanto mayor la intensidad de la turbulencia en el modelo más rápidamente se alcanza la dimensión fractal máxima. La evolución temporal reflejada por la dimensión fractal máxima puede ser una Buena medida del tiempo de residencia de un derrame de crudo en el mar Redondo et al (2007).

8 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se discuten los resultados obtenidos en el capítulo anterior y se analiza su concordancia con las leyes teóricas que describen los diferentes fenómenos.

También se analizan los experimentos, las posibilidades y potencial de la técnica de análisis de imágenes.

Algunos de los capítulos anteriores son sobre todo teóricos y descriptivos. Los primeros capítulos nos sitúan en la complejidad de los procesos hidrodinámicos y turbulentos, los siguientes en las campañas de campo realizadas para identificar dichos fenómenos y en los últimos se analizan los parámetros obtenidos. Pero es necesario evaluar críticamente todo ello, con el fin de ver las ventajas e inconvenientes de cada sistema de medida y la idoneidad de los parámetros estudiados, para tratar de explicar los procesos que intervienen y analizar estos resultados en base a las teorías existentes.

8.1 EVALUACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE MEDIDA

8.1.1 Sistemas de captación

Las principales ventajas de las técnicas ópticas son:

- Su capacidad de adquirir información sin interrupción ni interferencia en el flujo ya que es una técnica no intrusiva.
- Se toman datos de una zona, no solo de un punto.
- Són relativamente baratas, en comparación con el coste del instrumental (sensor de oleaje o correntímetros).
- Son muy flexibles, se adaptan a múltiples escalas, desde ondas capilares a mareas. Tan solo es cuestión de definir el campo visual y la resolución necesaria.

Sin embargo, los sistemas de vídeo poseen limitaciones que deben ser consideradas a la hora de ser usados, y que se describen a continuación:

En general, hay tres técnicas bien conocidas: el láser, el vídeo y la estéreo fotogrametría.

El láser permite obtener información de una o dos dimensiones por la refracción del rayo láser que pasa a través de la superficie del agua. Los escáneres láser son muy precisos, pero no pueden grabar directamente las elevaciones de la onda de superficie. Normalmente se utilizan para medir las ondas más cortas. Por otro lado, su capacidad de penetración es especialmente útil para el seguimiento de partículas y es la técnica más usada para el análisis del comportamiento de fluidos en laboratorio (Particle Tracking).

El análisis digital de imágenes de video obtiene información unidimensional dependiente, por la intensidad de la luz, de un sensor de imagen. Se basa en considerar que la reflexión o refracción de una fuente de luz registrada como intensidad es proporcional a la pendiente de la onda. Esta técnica se ha ampliado a las componentes bidimensionales, permitiendo la reconstrucción de topografía de superficie. Sin embargo tiene los siguientes inconvenientes:

- Dependencia de la fuente de iluminación, normalmente el sol, y las distorsiones generadas como reflexiones, paso de nubes, etc., que pueden alterar la intensidad y generar efectos topológicos no deseados. Si bien hay cámaras infrarojas, éstas son muy caras.
- No permiten enfoques muy lejanos (1-2 km) de resolución adecuada.
- Necesidad de la restitución de las imágenes a verdadera magnitud.
- Dificultad de detección de objetos y de bordes.

La estéreo fotogrametría también permite medir la superficie con mucha precisión y es la que se usa para determinar velocidad (tráfico) o para la restauración de patrimonio arquitectónico. Se basa esencialmente en el concepto de triangulación, en el que pueden restituirse objetos tridimensionales a partir de dos imágenes correspondientes a dos perspectivas de la misma zona. Puede aplicarse a una amplia gama de escalas espaciales y no se limita a las condiciones de campo o de laboratorio. Sin embargo, presenta problemas por la necesidad de obtener el doble de imágenes y porque éstas

deben identificar puntos iguales con perspectivas lo suficientemente diferentes como para poder realizar la triangulación y calcular su posición. El equilibrio entre la cobertura espacial y la resolución de altura limita el rango de longitudes de onda medibles. En caso de reflexiones de luz, no es posible la determinación geométrica. En estos casos, una tercera cámara puede ayudar a resolver las ecuaciones.

8.1.2 Equipo

ANALÓGICO O DIGITAL

Un sistema de vídeo digital es más complejo que un sistema analógico, ya que los soportes, cableado, software, digitalizador, etc no siempre son compatibles, mientras que el sistema analógico está mucho más sistematizado. Las normas y estándares de televisión han creado un mercado de plug-and-play para cámaras analógicas y digitalizadores donde componentes de muchos fabricantes operan juntos. Otro inconveniente es la dificultad para determinar los requisitos del sistema y la necesidad de un digitalizador de gran capacidad.

Las cámaras analógicas conectan con un solo cable coaxial delgado que pueden abarcar largas distancias; en cambio, las cámaras digitales tienen sus propios requisitos de cable exclusivo, añadiendo a la complejidad de la solución que suelen ser cables pesados, numerosos, cortos y difíciles de alargar o interconectar. Por consiguiente, para grabaciones a gran distancia habitualmente se emplean cámaras analógicas y se almacenan las imágenes digitalmente.

Sin embargo, la mayor resolución y velocidad de las digitales hacen que sea la solución preferida para aplicaciones que requieren imágenes de mayor resolución, mayor escala de grises, velocidades de fotogramas más rápidos y mejor calidad de la señal que la que se puede encontrar con una cámara analógica estándar.

COLOR O BLANCO Y NEGRO

Las cámaras en blanco y negro tienen el triple de contraste para la misma resolución, es decir una escala de intensidad tres veces mayor, ya que el color está formado por una combinación de tres colores básicos. Normalmente son RGB (Rojo, Verde y Azul), o CYM (Cyan, Amarillo y Magenta). Por ello, para analizar parámetros que se correspondan con una intensidad luminosa, el Blanco y Negro es mucho más recomendable.

8.1.3 Mecanismos de elevación.

GRÚA

Se trataba de una grúa con una pluma extensible de hasta 40 m. de largo. La pluma estaba controlada por un ordenador desde la cabina, de modo que podía volver a colocarse en la misma posición cada día con una precisión del orden del cm. Cada día era necesario reajustar su posición, pues por su propio peso caía algún cm.

La pluma se colocó formando un ángulo de aproximadamente 30° respecto a la perpendicular y a 45° de ángulo vertical; la altura de la pluma era de 22,3 m. y la distancia total al suelo de 27,3 m (ver figura 8.1). La cámara se ancló en el extremo

mediante una base atornillada prevista para dos cámaras (una en blanco y negro y otra en color). Del extremo de la grúa colgaba una cesta para ajustar enfoques. Las imágenes se transmitían por cable al magnestoscópio.

Las imágenes tomadas desde la grúa son oblicuas y, por tanto, tienen mayor distorsión debido a la inclinación de la superficie. Por otro lado, la grúa es más manejable, cómoda, menos delicada y da una imagen que no se mueve.



Figura 8-1. Grúa empleada en la campaña Delta'96 para elevar las cámaras de vídeo.

GLOBO

Se trataba de un globo de PVC de 4 m de diámetro hinchado con 4 tanques de Helio que tenía un empuje teórico de 15 kg. De su polo Norte salían tres cabos y repartidos por su ecuador diez más. Todos los cabos se recogían en un mosquetón. De éste se suspendía una cadena de un metro hasta el baricentro de un triángulo de aluminio que servía de base. El objeto de esta cadena era ganar estabilidad frente a pequeñas oscilaciones del viento al aumentar la inercia del soporte. Debajo de éste punto estaba la cámara en color (ver figura 8.2). De los extremos del triángulo salían tres cabos (de perlón de aproximadamente 1 mm de diámetro y de 100 Kp de resistencia). Dos de los cabos estaban anclados a tierra mediante muertos de hormigón con un carrete que permitía recoger y dar cabo. El tercero estaba anclado en el mar mediante una boya y su longitud no era regulable.

Debido a la escasa resistencia del globo había que proceder con mucho cuidado para que éste no pinchara. Se lleno de helio progresivamente y sin tocar en ninguna pared, para evitar perforar el PVC. A medida que se iba hinchando se distribuían las tensiones de los tirantes. Para rellenar las posibles fugas de Helio había una válvula, pero no fue necesario utilizarla. Después, se ataron todos los cabos al mosquetón y éste a la cadena con la base y la cámara.

Por la noche había que bajarlo para reducir los efectos del viento. Como lastre se usaron las propias botellas de Helio. Su posicionamiento tuvo que estimarse a partir de

dos puntos de posición conocida con un teodolito y se calculó la altura (aproximadamente 35 m).

El montaje es complicado y requiere mucho cuidado debido a la escasa resistencia del globo. Además es poco manejable y difícil de controlar, el viento lo mueve y la imagen no es fija. Esto implica que hay que elegir las imágenes de los momentos en que el globo con su balanceo pasa por el mismo punto. Los resultados obtenidos en Delta'96 son bastante buenos ya que, a pesar de que había algo de viento, la imagen no se mueve mucho.

Las imágenes obtenidas desde el globo tienen una visión cenital de la zona de medición incluyendo la mancha. Esto permite eliminar el efecto que produce la ola al inclinar la superficie; por tanto, con las imágenes cenitales, se puede aplicar la misma metodología para calcular difusión transversal que longitudinal. Así se pueden comparar datos sin tener la incertidumbre del error del método que se tenía anteriormente con la grúa, debido a la filmación oblicua.

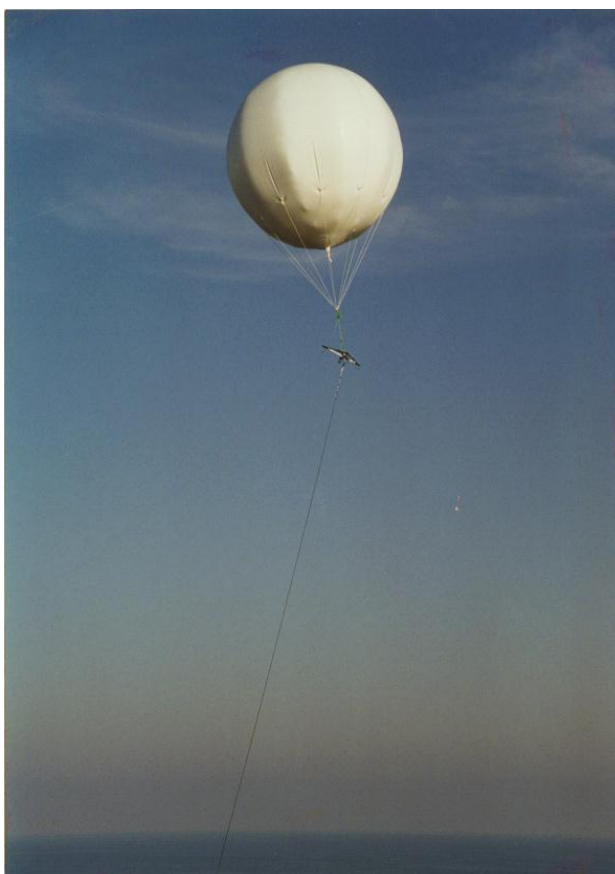


Figura 8-2. Globo con la cámara suspendida sobre la zona de rompientes.

MÁSTIL

En la campaña Delta'97 se trabajó en la zona de la pluma de la desembocadura del río Ebro. La interfase entre agua salada del mar y agua dulce del río era muy marcada, con un gran contraste de color remarcado por una rotura de olas debido al cambio de densidad. Las manchas de trazadores se tiraron dentro de la pluma, en la zona donde estaba el tetrápodo, para coordinar medidas. Como trazador se usó leche con fluoresceína.

Las cámaras se anclaron sobre una base de aluminio en forma de T situada sobre la cruceta superior del mástil, a unos 10 m de altura (Figura 8.3). Se colocó una cámara en cada ala de la T y el alma de ésta se ancló sobre la cruceta. Las cámaras estaban inclinadas unos 45° hacia abajo mirando a estribor.



Figura 8-3. Grabación desde lo alto del mástil.

El monitor que tenía que mostrar lo que se estaba registrando tenía una conexión floja y no era posible visualizar lo que se estaba grabando. Ante la duda de si se trataba de un problema del monitor o del registro, se grabó adicionalmente con una cámara portátil. Para ello, había que subir atado con un arnés, pero el movimiento del mástil a esa altura era considerable y por tanto, el de las imágenes también. Una vez en el laboratorio se vio que no era un problema del monitor sino que los magnetoscopios habían sido manipulados y el modo de grabación se había modificado.

Las manchas sufrían una gran advección alargándose a gran velocidad dejando una gran estela alargada en forma de cometa. Debido a ello, la mancha desaparecía del campo visual de las cámaras fijas en pocos minutos. En cuanto a la cámara portátil, ésta permitía seguir el campo de la mancha, pero con mucho movimiento y lejos de los puntos de referencia.

8.1.4 Metodología de las campañas de campo

Los experimentos de campo son costosos y complejos, por ello en la organización es fundamental tener en cuenta:

En cuanto a la metodología cabe destacar que el éxito y la complejidad de las medidas se deben a la adquisición armónica de gran número de datos con diferente instrumental. Ello permite su calibración, validación y comparación en distintas situaciones.

Lo primero que hay que hacer en cualquier campaña es definir la zona de actuación, resolución espacial y temporal de acuerdo a las escalas de estudio. Estas escalas determinan el instrumental necesario (frecuencia de muestreo, error medio, etc), la geo-referenciación, el soporte del instrumental y su disposición.

Teniendo en cuenta la Ley de Murphy, no hay que dejar nada a la improvisación y tener una planificación detallada y hacer ensayos previos. Se debe tener en cuenta la agresividad del medio para elegir materiales resistentes y duraderos, sistemas de anclaje que eviten vibraciones, intrusiones y movimientos no deseados, etc.

No obstante, hay que asumir que pueden surgir imprevistos. Se debe considerar y disponer de recambios del material y alternativas de disposición por si falla algo. Especialmente hay que tener en cuenta la sustitución de las fuentes de energía y pequeño material fungible de recambio como cables y conectores.

Los aparatos deben calibrarse y sincronizarse previamente y posteriormente, si es posible en condiciones parecidas a las de los experimentos, aunque nunca se puede predecir una calma o una tormenta, por lo que se debe tener paciencia y temple.

Hay que documentar rigurosamente y establecer una nomenclatura común para los diferentes equipos humanos y instrumentales.

Es importante anotar las observaciones que se puedan apreciar y detalles que permitan explicar situaciones inicialmente no detectados, como presencia de algas en el instrumental, paso de nubes o variaciones de luz en las imágenes.

Se recomienda hacer periódicamente backups de las medidas o copias de seguridad para asegurar no perder accidentalmente los datos.

8.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE DISPERSIÓN

8.2.1 Zona de rompientes

En la zona de rompientes los coeficientes de dispersión horizontal pueden variar en condiciones similares hasta un orden de magnitud, aunque se observa una dependencia clara con la distancia a la orilla motivada por la corriente longitudinal así como por las condiciones del oleaje (Figura 8.4). Las variaciones espaciales y temporales pueden cuantificarse de forma similar a un coeficiente de viscosidad turbulenta y ser utilizados en el modelado hidrodinámico de fenómenos costeros tales como la circulación, el transporte de sedimentos y la dispersión de contaminantes.

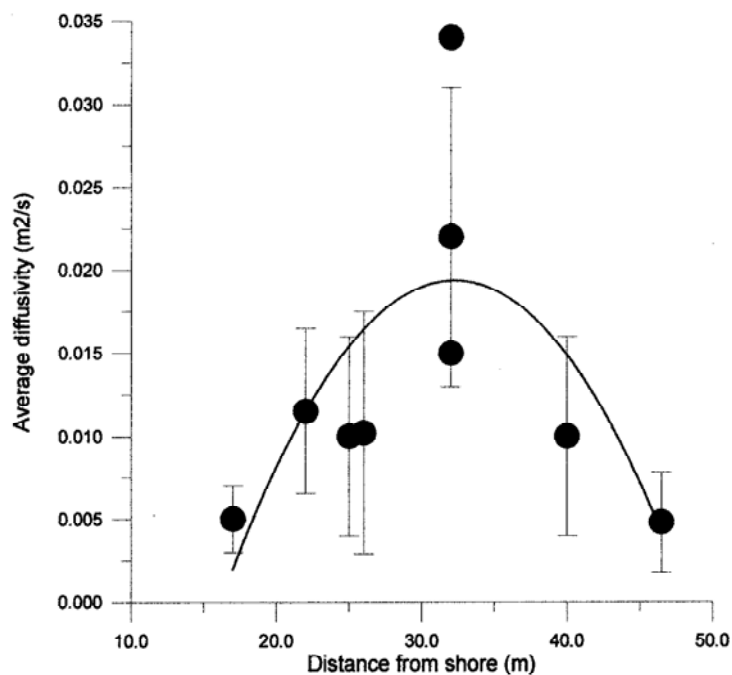


Figura 8-4. Variación del coeficiente de dispersión y la distancia a la orilla.

Según la ley de dispersión de Richardson, el coeficiente de difusión K depende de la tasa de disipación de energía ϵ y al tamaño de la mancha L :

$$K \propto \epsilon^{2/3} L^{4/3} \quad \text{Ec. 8-1}$$

Esta ley no es directamente aplicable en la difusión en Zona de Rompientes debido a que los picos del espectro de energía provocado por la rotura están muy cerca y el subrango inercial es muy pequeño. Sin embargo hay fuertes evidencias de que el coeficiente de dispersión en la Zona de Rompientes depende del tamaño de la mancha L . Horikawa et al. (1978) encontraron que:

$$K \propto L^{1.15} \quad \text{Ec. 8-2}$$

Los resultados de la simulación numérica con el modelo de dispersión 2D DISPER, (Bahia, 1997), se aproximan a los obtenidos por el proceso de digitalización y tratamiento de una mancha real.

El promediado temporal de las imágenes y las series temporales de intensidad en transectos (líneas horizontales o verticales de una imagen) han demostrado ser una técnica conveniente para la caracterización de la dispersión de trazadores, simulando contaminantes, en presencia de olas y corrientes, aún en medios de tan compleja medición como la zona de rompientes.

Los valores observados, y su tendencia, muestran que en el interior de la zona de rompientes no es aplicable una relación directa del tipo “ley 4/3” para el coeficiente de mezcla, ya que el proceso de dispersión es más complejo como se explica en el apartado 8.7.

8.2.2 Turbulencia y dispersión

El transporte de turbulencia de un escalar (concentración de mancha c) en un campo de velocidades v inducido por oleaje o por una combinación de otros agentes como corrientes de cizalla, fricción del fondo o viento se puede considerar, en una primera aproximación, como proporcional a los gradientes de la concentración:

$$\overline{c'v'} = K \frac{\partial c}{\partial x} \quad \text{Ec. 8-3}$$

Para estimar el efecto de la difusión turbulenta inducida por el oleaje se emplea el número de Reynolds de un flujo definido como el producto de la altura de ola incidente H y la velocidad orbital V dividido entre la viscosidad cinemática ν del agua de mar.

$$R_w = \frac{HV}{\nu} \quad \text{Ec. 8-4}$$

La velocidad orbital V puede ser estimada como el cociente entre altura H (o la longitud de onda media λ) y periodo T , ambos parámetros se pueden cuantificar con el vídeo:

$$V=H/T \text{ o } V=\lambda/T \quad \text{Ec. 8-5}$$

La diferencia entre ambos métodos de cálculo depende del peralte $\tan\alpha=2H/\lambda$, que variará en función de si el oleaje rompe o no. La rotura también depende del calado D y del coeficiente de rotura $\gamma =H/D$ ($\gamma=0.78$); pero para playas muy tendidas se puede aproximar por:

$$V = \sqrt{g(H + D)} \quad \text{Ec. 8-6}$$

y entonces R_w es proporcional a $H^{3/2}$ para olas no rotas, y a H^2 para la zona de surf:

$$R_w = \frac{2H^2}{\tan\alpha T\nu} = \frac{\tan\alpha\lambda^2}{2T\nu} \quad \text{Ec. 8-7}$$

Los valores del número de Reynolds correspondiente a cada caso se comparan con los coeficientes de difusión longitudinal y transversal (Figura 8.5).

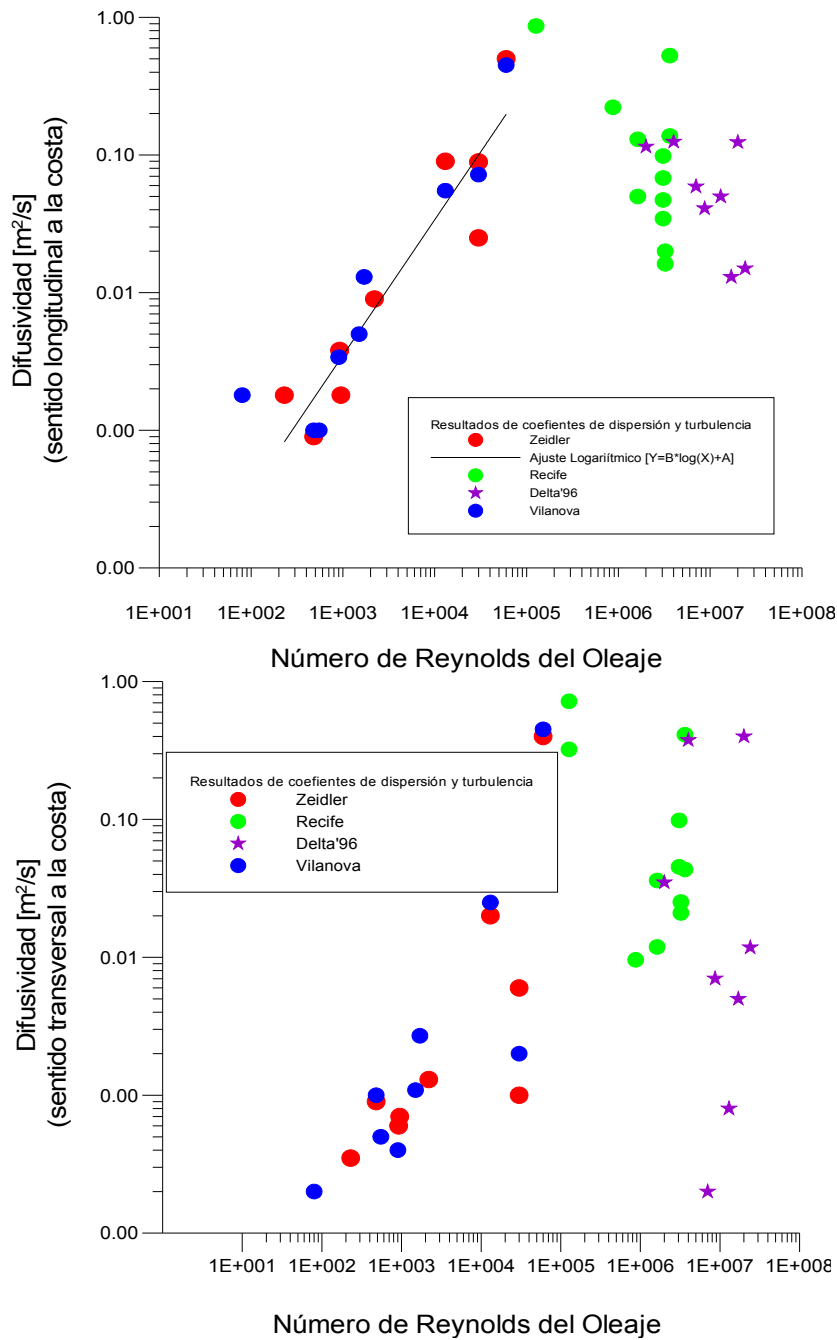


Figura 8-5. Relación del coeficiente de difusión y número de Reynolds.

Los valores del número de Reynolds correspondiente a cada caso se comparan con los coeficientes de difusión longitudinal y transversal (Figura 8.5) medidos.

Los valores medidos también se comparan con los coeficientes estimados por la ley de Zeidler. Según Zeidler (1976) se puede estimar el coeficiente de difusión K según el número de Reynolds $K=cR_w$ para oleaje en un rango de R_w altos, entre 10^3 y 10^6 , sin corrientes longitudinales ni de marea.

El resultado de más de 100 experimentos muestra que hay una cierta dependencia entre la difusividad y el número de Reynolds por el caso de Vilanova: al crecer del número de Reynolds crece el valor de difusividad análogamente a los valores estimados por Zeidler.

Parar Recife y Delta '96, parece que no haya una dependencia definida. En el caso de Recife, la difusividad máxima se alcanza por valores menores de R_e respecto a la difusividad mínima, pero no es posible delinear una tendencia bien definida. Lo que se puede deber a otros efectos más importantes como corrientes o viento. En particular, en Delta96, la presencia de corrientes producía un efecto de cizalla que tendía a alargar la mancha, con valores altos de $R_w = 3 \cdot 10^4$ y 10^7 .

Para la mayoría de los casos, la difusión longitudinal es mayor que la transversal, y sólo en los casos con corrientes de retorno se produce lo contrario.

Se dan valores por encima-izquierda de la franja, llamados hiperdifusivos, en los que hay una gran difusión con viento suave. El oleaje no es debido al viento local sino al mar de fondo. Al retirarse el viento en el mar queda bastante energía como para generar una alta difusión. Así mismo los valores en la zona baja-derecha o hipodifusivos donde hay una difusividad inferior a la esperada se explican porque los agentes forzadores empiezan a actuar y se necesita cierto tiempo para desarrollar la turbulencia y que haya una transferencia de energía de un medio a otro. El retraso entre la actuación de los distintos agentes explica estos comportamientos que se apartan de la relación lineal.

Según Zeidler (1976) se puede estimar el coeficiente de difusión K según el número de Reynolds $K_x = cR_w^{4/5}$ para oleaje en un rango de R_w altos, entre 10^3 y 10^6 , sin corrientes longitudinales ni de marea.

Los resultados de los experimentos en costa no confirman esta ley pues había otros efectos más importantes como corrientes o viento. En particular, en Delta96, la presencia de corrientes producía un efecto de cizalla que tendía a alargar la mancha, con valores altos de $R_w = 3 \cdot 10^4$ y 10^7 .

Para la mayoría de los casos, la difusión longitudinal es mayor que la transversal, y sólo en los casos con corrientes de retorno se produce lo contrario. La anisotropía viene marcada por la propia anisotropía del oleaje y por tanto del número de Reynolds como se puede ver en los experimentos de Delta 96, sin embargo en los de Recife no se nota tanto pues están dominados por la marea. Los de Zeidler en mar abierto no tienen una tendencia tan marcada.

En el puerto de Barcelona, por la condición propia de aguas abrigadas, el oleaje era bajo y la difusión estaba dominada por otros agentes. Se dieron incluso valores negativos de la difusividad transversal por elongaciones afectadas por las corrientes generadas por efectos de contorno, reflexiones o difracciones, por lo que no se incluyen en el gráfico.

8.2.3 Análisis de los resultados de dispersión en el puerto de Barcelona

En la figura 8.6 se muestra la variación medida con una precisión de 10s de la evolución de las difusividades para los distintos experimentos del puerto de Barcelona a escala decimal y logarítmica. El rango de valores de difusividad es consistente con el nivel de turbulencia ambiente $0,1-5 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$.

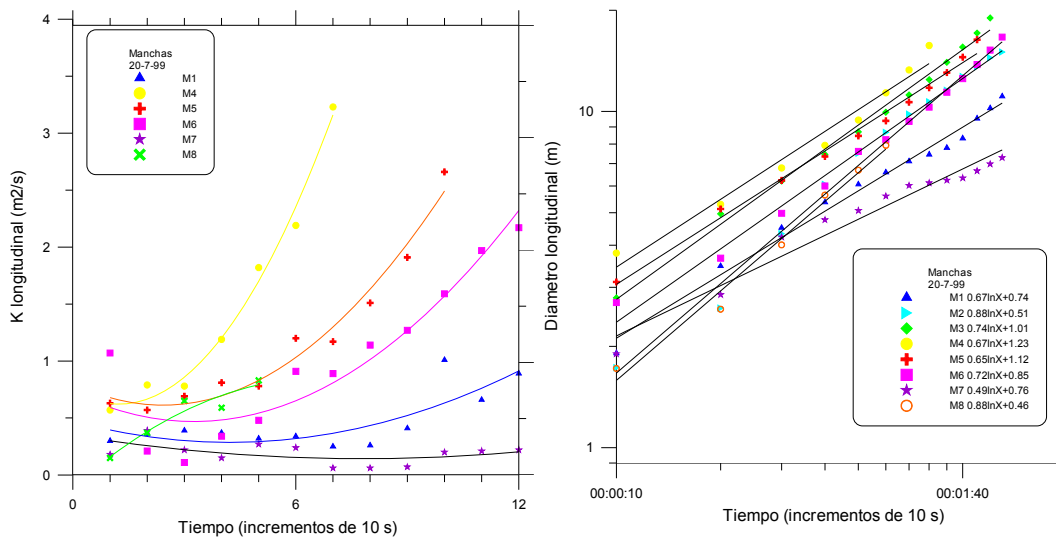


Figura 8-6. Variación de la difusividad con el tiempo. 20-7-99.

Se aprecia una consecuencia directa de la Ley de Richardson de la difusión, es decir que el coeficiente de difusión aumenta proporcionalmente al tamaño de la mancha elevada a 4/3, $K(D)=cD^{4/3}$. Esta dependencia es equivalente a que el diámetro característico aumente en el tiempo con una dependencia temporal $D = c t^{3/2}$ de manera que $K(D)=c(t^{3/2})^{4/3}=ct^2$ o más genéricamente $K=ct^{n(t)}$ según se indica en el apartado 4.4.

Los casos donde $K(t)$ disminuye con el tiempo, usualmente se deben a que la dilución de la mancha está por debajo del umbral de resolución del digitalizador. Con el tiempo, el grado de dilución hace que no sea perceptible y parece que se estabilice el diámetro, como en las manchas 8 y 9 de la figura 8.7.

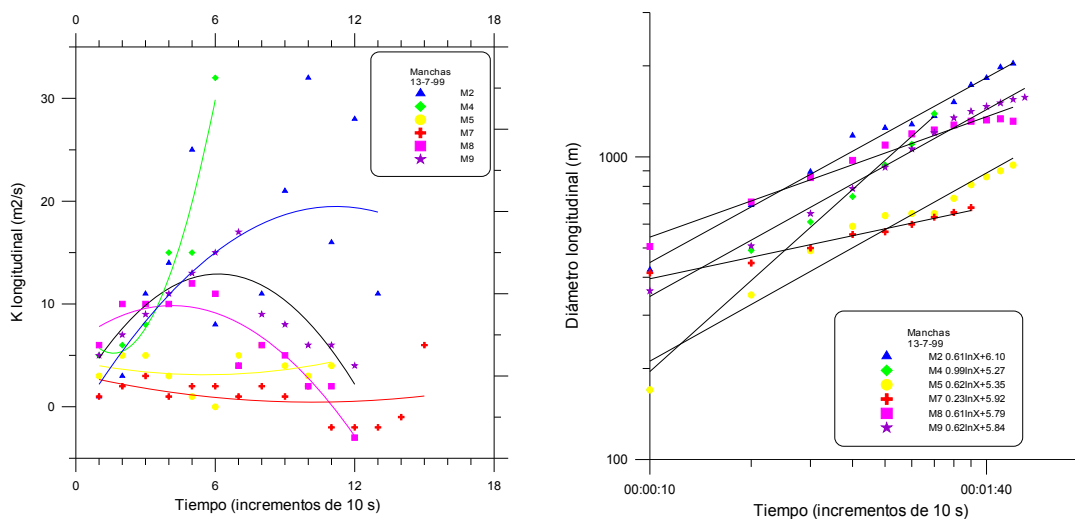


Figura 8-7. Variación de la Difusividad y el diámetro con el tiempo. 13-7-99.

Por otro lado se dan casos en que la mancha no crece en una dirección y lo hace mucho en otra, se produce un elongamiento que llega a filamentarse. Se suele producir al situarse en zonas entre remolinos, también se detectan fenómenos parecidos por difracción o reflexión. Como se puede ver en la figura 8.8, las

pendientes finales de las manchas 2 y 4 sufren alteraciones que se desvían de la ley de Richarson.

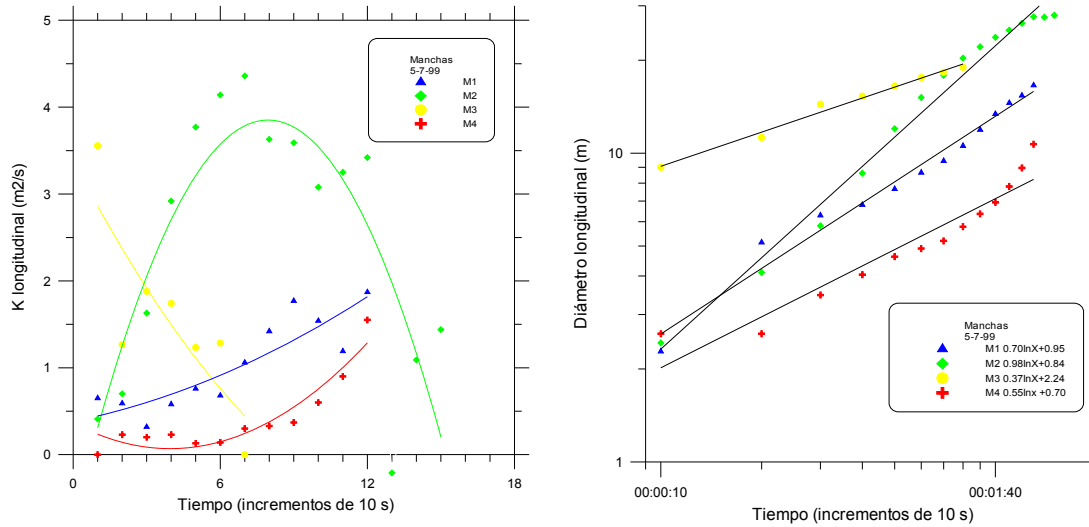


Figura 8—8. Variación de la Difusividad y el diámetro con el tiempo. 5-7-99.

INFLUENCIA DE LOS AGENTES FORZADORES

Para la influencia de los distintos agentes forzadores se hacen gráficas cruzadas de los coeficientes y lo distintos parámetros, para intentar obtener la tendencia de su respuesta. Con la influencia clara de la geometría de la bocana y del tipo de flujo local mostrado en el capítulo 7 de resultados, está claro que sólo pueden compararse directamente experimentos de la misma zona y condiciones. Se han distinguido tres zonas: aguas afuera, zona de difracción y aguas adentro (Figura 8.9). Se puede apreciar que en la dispersión hay fenómenos más relevantes que la corriente, como la cizalla y el viento.

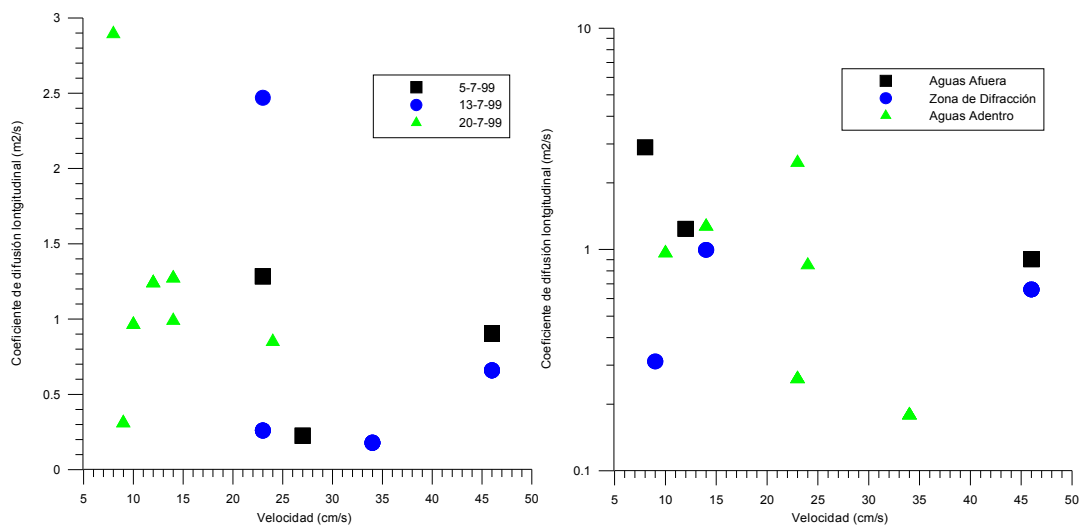


Figura 8-9. Difusión por advección por días y por zonas

Uno de principales mecanismos de mezcla es la tensión tangencial o cizalladura. Suponiendo el agua fluido newtoniano, la fricción de los contornos produce un cortante que se refleja en el gradiente de velocidades. Se puede observar que la hidrodinámica

de la zona es compleja y el campo de velocidades varía localmente por las condiciones de contorno y temporalmente según los agentes energéticos, oleaje, viento y marea (Figura 8.10).

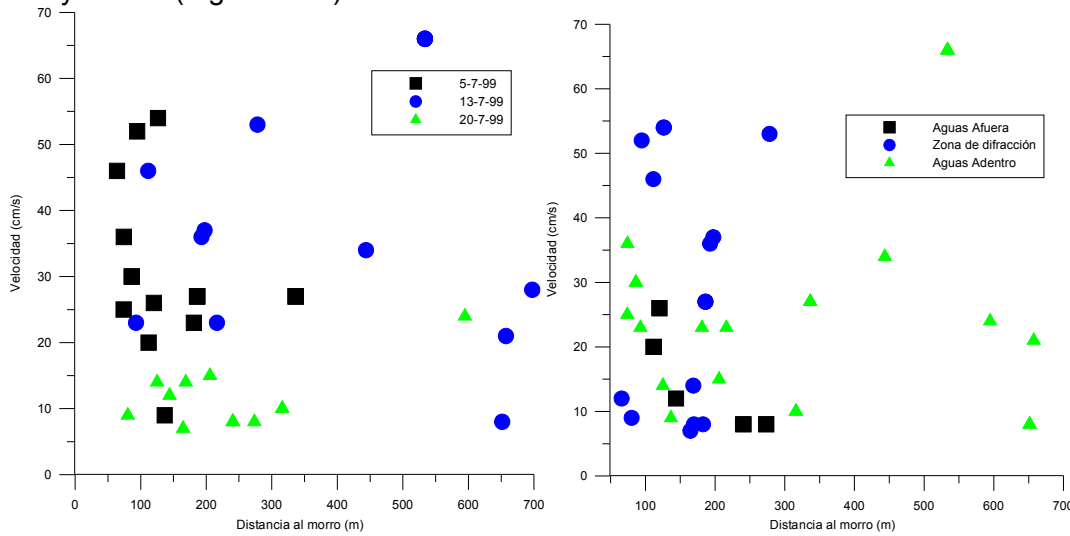


Figura 8-10. Velocidad y posición de los trazadores por días y por zonas.

En la figura 8.11 se representa la dispersión frente a la distancia al morro. Dado que los contornos son capas de tensiones de corte, este parámetro valora la posición en esta capa.

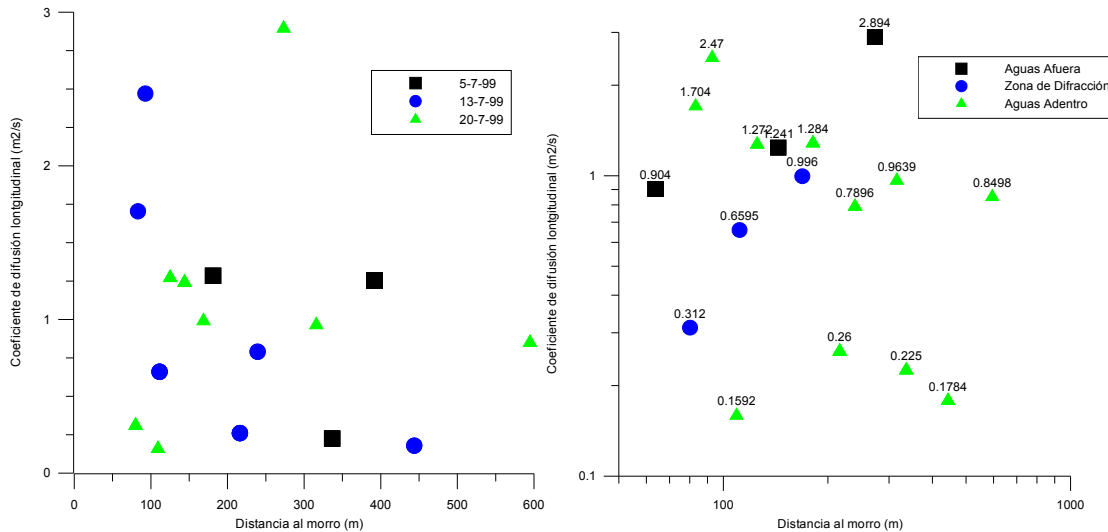


Figura 8-11. Dispersión y posición respecto el morro de los trazadores por días y zonas.

En las zonas de aguas afuera y de difracción hay pocas medidas de dispersión, una por día, de forma que no se pueden deducir tendencias. En la zona de aguas adentro se puede distinguir la influencia de los días sin viento con difusividades bajas, inferiores al valor de $1\text{ m}^2/\text{s}$, de los días con viento. En estas aguas se puede apreciar una tendencia decreciente pues al separarnos del contorno la cizalla es menor.

En la figura 8.12 se representa la dispersión frente al cociente entre la velocidad y la distancia al morro. Dado que los contornos son capas de tensiones de corte este parámetro valora este rozamiento.

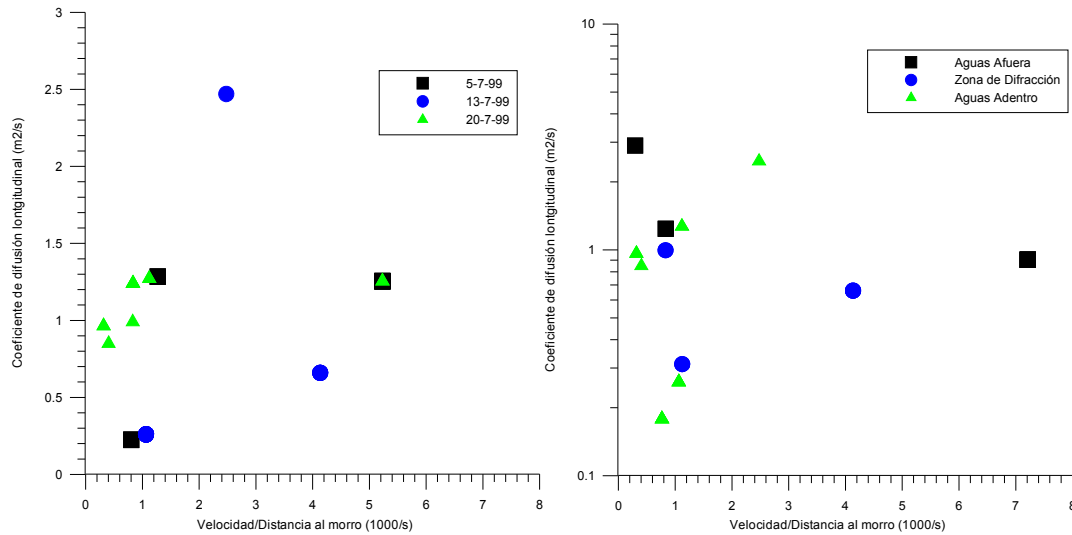


Figura 8-12. Difusión y cizalla por días y por zonas.

La cizalladura depende de la posición, de forma que se puede definir una capa límite en que la fricción domina la respuesta. A su vez depende de la velocidad media y cuanto mayor sea la corriente menor será la capa límite. Por ello, consideramos el coeficiente entre estos parámetros como una medida de cizalladura.

En la figura 8.13 se representa la difusión frente al cociente entre la velocidad superficial y la altura de ola. Este parámetro sirve para evaluar la corriente inducida por el oleaje. No se puede decir que se observe una tendencia marcada, principalmente porque las características energéticas del oleaje eran bajas, por lo que era un mecanismo forzador de baja intensidad.

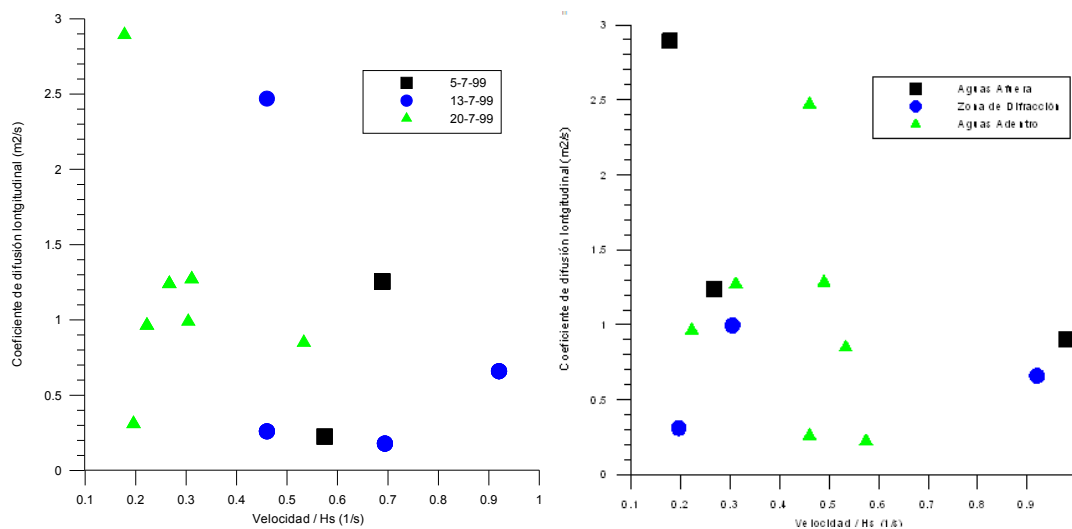


Figura 8-13. Difusión y corriente inducida por días y por zonas.

En la figura 8.14. se representa, por días, la difusión frente a la intensidad de viento de la estación meteorológica, a 10 m de altura.

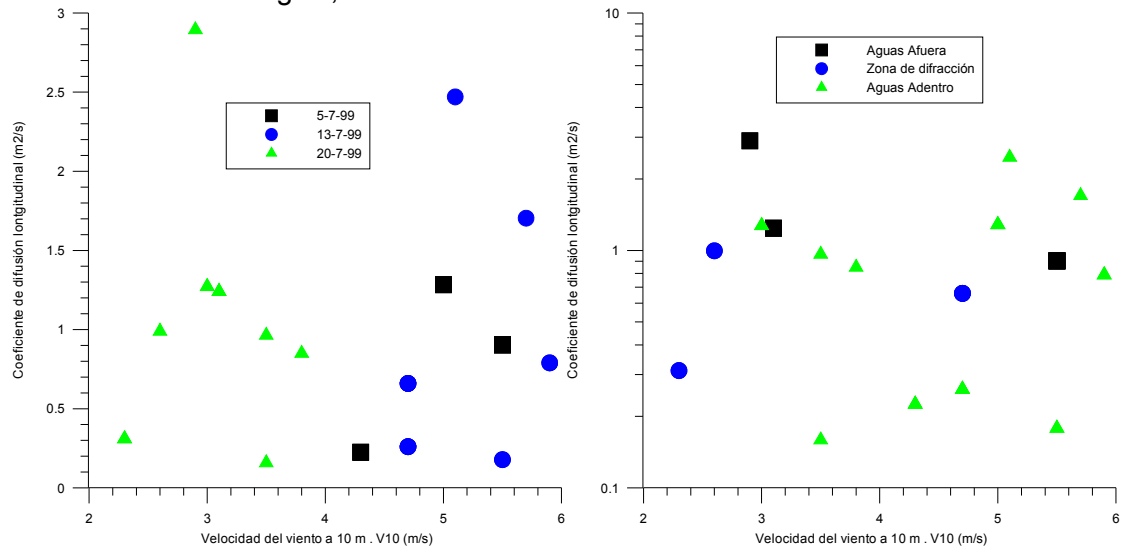


Figura 8-14. Difusión y viento por días y zonas.

Se distingue que hay un día mucho más calmado que los otros dos, el día 20-6-99. Los coeficientes de dispersión son mucho menores, salvo un punto anómalo, coincidente con la zona de difracción, donde hay una fuerte cizalla local.

En la figura 8.15 se representa la difusión frente al calado. La altura de la columna de mezcla puede limitar el diámetro del remolino para grandes escalas.

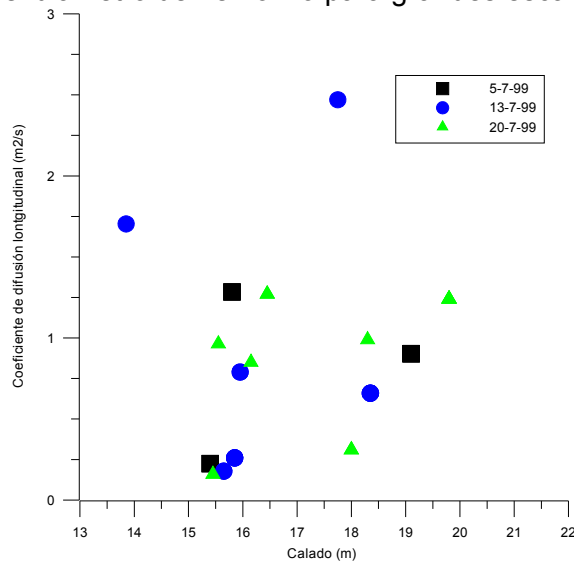


Figura 8-15. Variación de la difusividad con el calado

Se comprueba que en la zona de la bocana del puerto no existe dependencia entre el valor de la difusividad y la profundidad de la zona. Esto es de esperar, ya que no hay rotura de oleaje ni una influencia de la batimetría de la zona en el flujo, y en condiciones de verano se ha constatado que el flujo está estratificado (Marí, 1998).

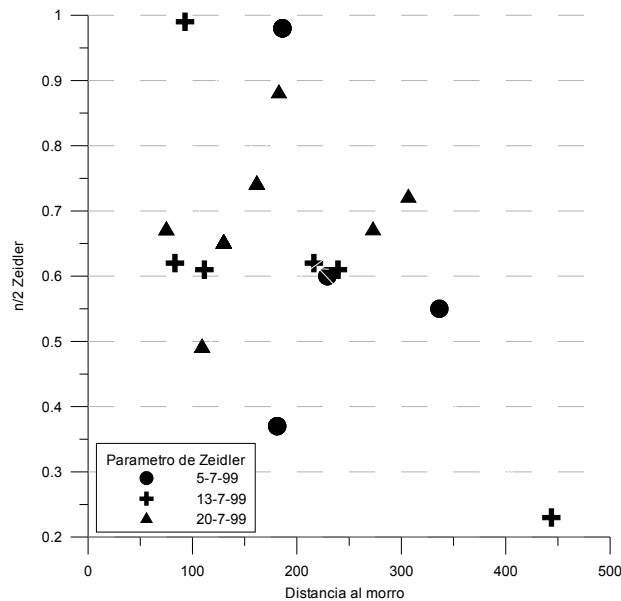


Figura 8-16. Comparación del número de Zeidler $n/2$ y la distancia al morro del dique.

La dependencia con el número de Zeidler no es muy marcada porque el número de puntos es bajo pero se marcan tendencias inversamente proporcionales a la distancia, del tipo $K = 1/D^n$.

8.2.4 Efecto del viento en la dispersión

En los experimentos realizados en el puerto de Barcelona, el comportamiento de las líneas de corriente es similar en todos los casos y se puede imponer como parametrización empírica una separatriz en la línea que siguiendo la dirección del viento en superficie, intersecta el centro de la bocana del puerto de Barcelona. En casos de viento sur-sureste (típicos de la mayoría de las medidas), estos producen una inversión local de la corriente dominante a mesoescala proveniente del Noreste (Liguro-Provenzal). En verano, solo el 13 de Julio de 1999 había una componente de la corriente Liguro – Provenzal al norte de la bocana en el exterior, produciéndose una circulación debida al viento hacia el interior del puerto. En invierno, la situación típica tuvo lugar el día 17 de Marzo del 2000, pero sólo a primera hora de la mañana, ya que a partir de las 12:15 el viento del suroeste produjo una variación de la dirección de la corriente superficial.

En las escalas de los experimentos tanto espaciales como temporales, el efecto de la Rotación terrestre es irrelevante y las características del flujo están determinadas por la batimetría y la geometría propia de la zona de difracción del muelle, que suele generar un punto de remanso y una zona de fuerte divergencia.

Los experimentos en el puerto de Barcelona muestran que la influencia de la marea o la pluma del Llobregat puede desviar la dirección de la corriente respecto del viento significativamente, llegando incluso a oponerse a él, para vientos suaves de hasta 3 m/s, como el caso del día 27.7.2000 (Figura 8.17).

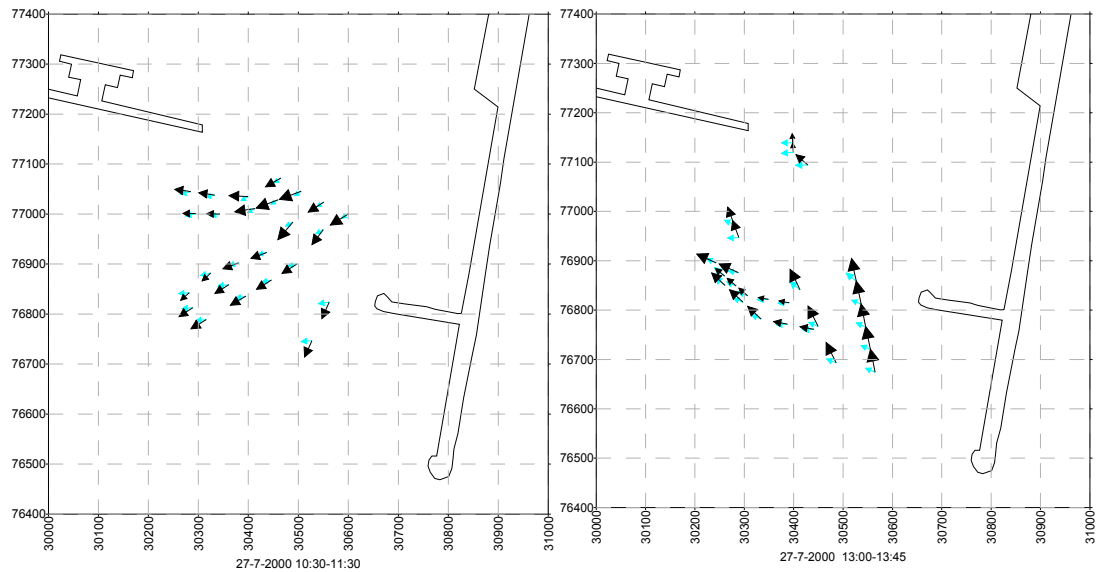


Figura 8-17. Velocidades del día 27.7.2000 a las 11:30 y las 13h.

También se puede observar el efecto venturi que produce el contorno del canal de navegación, produciéndose mayores velocidades en los estrechamientos.

La marea es de muy poca amplitud y no produce corrientes significativas en comparación con el efecto del viento y la corriente a mesoescala (Liguro –Provenzal).

Es de destacar la detección de “Seiches” o resonancia de unos 1000 s de periodo, con generación de vórtices en la parte exterior de la bocana del puerto de Barcelona.

Tanto superficialmente como en vertical, se ha visto que se desarrollan remolinos que invalidan la hipótesis de homogeneidad vertical de algunos modelos numéricos.

A partir de estos primeros resultados se ha podido correlacionar la corriente v_c con el viento v_w .

En zonas costeras rectas, sin estratificar, planas longitudinalmente, con un viento desarrollado sin obstrucciones de la ecuación del momentum Luger et al. (1999) propusieron que:

$$V_c = 2.8\% \cdot v_w \quad \text{Ec. 8-8}$$

Harris et al. (1973) no es tan estricto y da un rango de un 2 a un 5% de la velocidad del viento que comprende el resultado obtenido.

En una primera aproximación, no parecía haber una dependencia directa dado que se superponen muchos efectos. Para separarlos se hizo una descomposición en coordenadas como se ve en la figura 8.18. Para la coordenada X (dirección E-W) se obtuvo la siguiente correlación para 233 puntos y con un error medio cuadrático de 0.717989:

$$V_{cx} \text{ (cm/s)} = 2.306 V_{vx} \text{ (m/s)} + 0.148 \quad \text{Ec. 8-9}$$

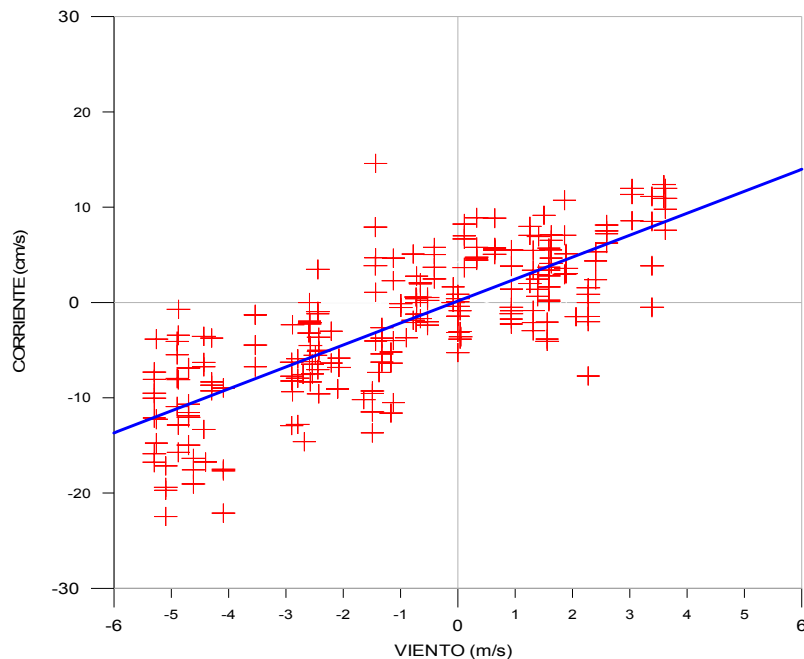


Figura 8-18. Correlación de viento y corriente en el eje X.

Hay experimentos en los que la correlación está desfasada debido al retardo entre el inicio de la acción del viento y el desarrollo de la corriente. Este desfase según diferentes autores puede ser de 2 a 12h. El hecho de que la recta no pase por el origen de coordenadas supone que el efecto de llenado-vaciado de la marea y otros agentes tienen una influencia en la hidrodinámica que no se puede obviar.

La correlación en el eje Y (dirección N-S) produjo una nube de puntos por lo que en dirección transversal al principal canal de navegación cabe destacar otros factores.

En las zonas cercanas al morro o en las zonas cercanas a muelles, donde los efectos de difracción y reflexión eran muy notables, se producían corrientes por dispersión de la energía, no debidas al viento, que en unas ocasiones aceleraban los trazadores y en otras los retenían.

En los experimentos de Recife y Barcelona se tomaron datos de perfiles de viento a distintas alturas. En la siguiente figura se muestra el ajuste del perfil de los valores medios de viento (círculos) y de las fluctuaciones (cruces). En muchos casos con un oleaje importante se empezó con perfiles logarítmicos de viento de alturas menores que la media del momentum debido a la interacción viento-olas. Extrapolando el perfil semilogarítmico a $v=0$ define una altura de rugosidad z_0 . En los experimentos de Recife los valores medidos fueron de viento suave, de unos 3 m/s en orilla y la altura de fricción de 10 cm.

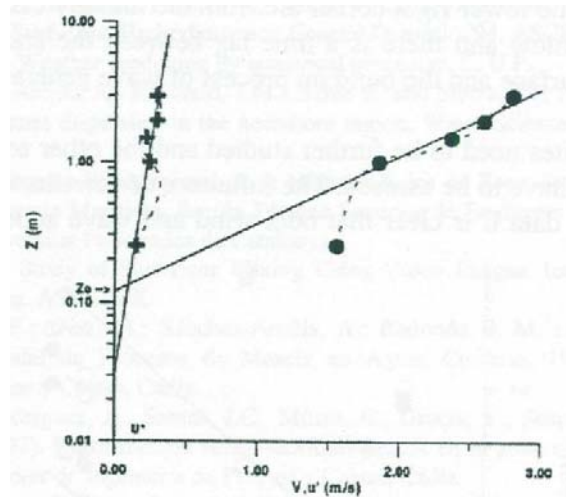


Figura 8.19 Perfil de viento en Recife. Valores medios y desviaciones. (Díez et al 2000)

La característica de la fluctuación cerca de la superficie también indica que el nivel de fricción de la velocidad puede calcularse como proporcional a la pendiente.

$$U(z) = \frac{u_*}{k} \ln(z/z_0) \quad \text{Ec 8.10}$$

Dónde k es la constante de Karman ($k=0,42$) y z_0 es la longitud de fricción, que se puede evaluar de la figura. El viento medio y la media cuadrática de las fluctuaciones del viento turbulento. Las tensiones de Reynolds se puede evaluar a partir de la velocidad de fricción como $\tau = \rho u_*^2$. Este mecanismo físico desempeña un rol más o menos importante según el lugar.

La capa de Ekman es aquella en la que las fuerzas de rozamiento no son despreciables. Esta capa forma un ángulo recto con el viento al moverse y se desvía a la derecha del viento con un ángulo menor que constituye la deriva de Ekman. De manera que la inducción de corriente por viento sufre un retraso y un ángulo relativo, que según Martínez et al (1998) es entre 13 y 38° .

El coeficiente de difusión así mismo depende de la velocidad de corriente y de su posición $K_x = v_{cx} L_x$

8.2.5 El efecto de la marea

Bezerra 2009 realizó experimentos en zonas portuarias y estuarios para evaluar el efecto de la marea. En todos los casos estudiados, la mezcla se produce en superficie con escalas variables de 1 a 15 m, advección y difusión actúan simultáneamente. El predominio de un proceso sobre otro variaba según la zona de estudio y las condiciones ambientales. En Mucuripe predominaba la advección sobre la difusión, al contrario que en Miramar y Soure. Los resultados demuestran que hay una relación directa entre velocidad y la fricción del viento en la superficie, factor predominante que produce anisotropía. El viento es más importante cuando la marea es alta. Se confirma que el efecto de la marea es mayor durante la fase de llenado y vaciado que cuando está en sus fases extremas.

Experiment	Day	Hour	Tide stage	Predominant direction of the surface current (Az)	Surface current average (m/s)	Water surface wind average (m/s)	Wave H (m) and T (seg)	KDxm (m ² /s)	KDym (m ² /s)
Comparison of data from the two Mucuripe Port experiments in Fortaleza. Neap tide.									
1	11/03/06	08:58	Low tide	218	0.01	1.2055	0.1 and 3	0.03194	0.063654
2	11/03/06	12:52	Flood	155	0.14	1.9898	0.1 and 3	0.10168	0.189563
Comparison of the Miramar data for the four experiments. Spring tide.									
1	26/10/07	08:00	Flood	-	-	1.36	0.2 and 2.5	0.0176	0.1152
2	26/10/07	10:00	Flood	235	1.08	5.98	0.8 and 2.4	2.3522	0.0976
3	26/10/07	12:30	High tide	334	0.227	1.90	0.3 and 3.3	0.0962	0.0663
4	26/10/07	16:00	Ebb tide	60	1.39	2.87	0.4 and 3.3	0.3039	0.0122
Comparative data of the four Soure experiments. Neap tide.									
1	02/11/07	13:00	Flood	306	0.47	3.51	0.2 and 0.8	0.915849	0.170156
2	02/11/07	16:40	High tide	236	0.067	4.74	-	0.156816	0.156816
3	03/11/07	07:40	Ebb tide	153	0.52	1.01	0.2 and 1.9	1.526415	0.1815
4	03/11/07	11:20	Low tide	248	0.108	3.51	0.3 and 1.4	0.089723	0.227749

Tabla 8-1. Experimentos de Brasil.

8.3 ESPECTROS DE ENERGÍA

El procesado de datos de imágenes de vídeo que se llevó a cabo, estaba bajo la suposición de que la intensidad de la luz era constante a través de las pruebas. Evidentemente, las intensidades de vídeo dependen de la calidad de la iluminación en el área de estudio y durante la prueba, los cambios de posición de sol (o si pasa una nube) también puede cambiar la iluminación.

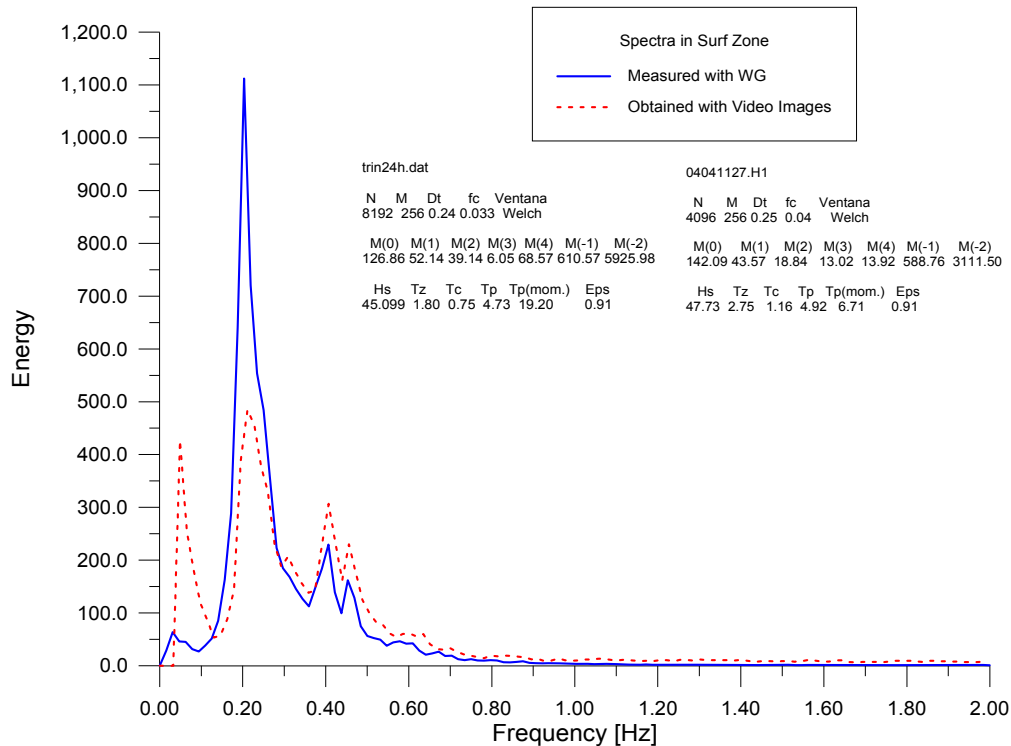


Figura 8-20. Comparación de del sensor de altura y de imágenes

Cuando se comparan los campos de onda obtenidos con el sensor de presión y los obtenidos con las imágenes de vídeo (Figura 8.20), hay una gran coincidencia en el rango de las frecuencias. Los picos de la energía sufren más distorsión debido a la rugosidad de la superficie del agua, especialmente cuando el ángulo de incidencia de la luz disminuye, es decir, cuando el análisis tiene que llevarse a cabo a un punto remoto. La vista óptima es cuando el ángulo es de cerca de 45° .

El pico principal en los espectros de las imágenes de vídeo es menor que el medido con sensor ya que, aunque ambos pueden detectar la cantidad de energía del campo de onda, las imágenes de vídeo tienen más resolución espacial que el medidor de onda (5 cm).

Sin embargo el pico de ondas de de baja frecuencia es mayor con los datos del sensor que con los de imágenes. La oscilación de onda infragravittaroria tiene una amplitud muy pequeña en comparación con su longitud de onda, cuando es menor de 5 cm, el medidor de onda es incapaz de detectarla, mientras que si lo hace el análisis de imágenes de vídeo

Hay una transferencia de energía de la frecuencia del pico principal (4,92 s) a un armónico que aparece en el doble de la frecuencia media de los picos (2,46 s).

Además, existe un pequeño pico en 2,21 s, que probablemente es debido a un oleaje local causado por un pequeño viento que soplaba en paralelo a la línea de Costa.

Una discusión más detallada de estos resultados puede verse en diez (1998), Möso (2003) y Möso et al. (2007).

Cuando se realizan los análisis espectrales, se debe tener cuidado en la interpretación en la banda de baja frecuencia. Si la resolución espectral en los análisis no es la adecuada, puede subestimar la cantidad de energía en esa región. A fin de aumentar la resolución en la región de baja frecuencia de las series de tiempo de presión, se incrementó artificialmente la frecuencia de muestreo, estimando los datos con una mayor Δt . Después de realizar un estudio detallado de la región de baja frecuencia, no se encontró nada notable. De cualquier manera, una serie de tiempo más larga podría permitir un estudio detallado de oscilaciones de baja frecuencia.

Con el análisis de imágenes algunos parámetros hidrodinámicos tales como la asimetría de espectros de energía, la dirección, la propagación de la frecuencia, etc., pueden cuantificarse fácilmente (por ejemplo, Lippman y Holman, 1992; Redondo et al. 1994 entre otros). Se pueden efectuar comparaciones entre las propiedades de onda en la zona de costa y la zona de rompientes, estableciendo la deformación de las olas durante el proceso de ruptura. La comparación de las formas iniciales y subsiguientes del espectro de ondas, es decir, el espectro en la zona de costa, de rompientes y de orilla puede verse en la figura 8.20. Los picos se producen a las mismas frecuencias pero con niveles de energía sucesivamente menores.

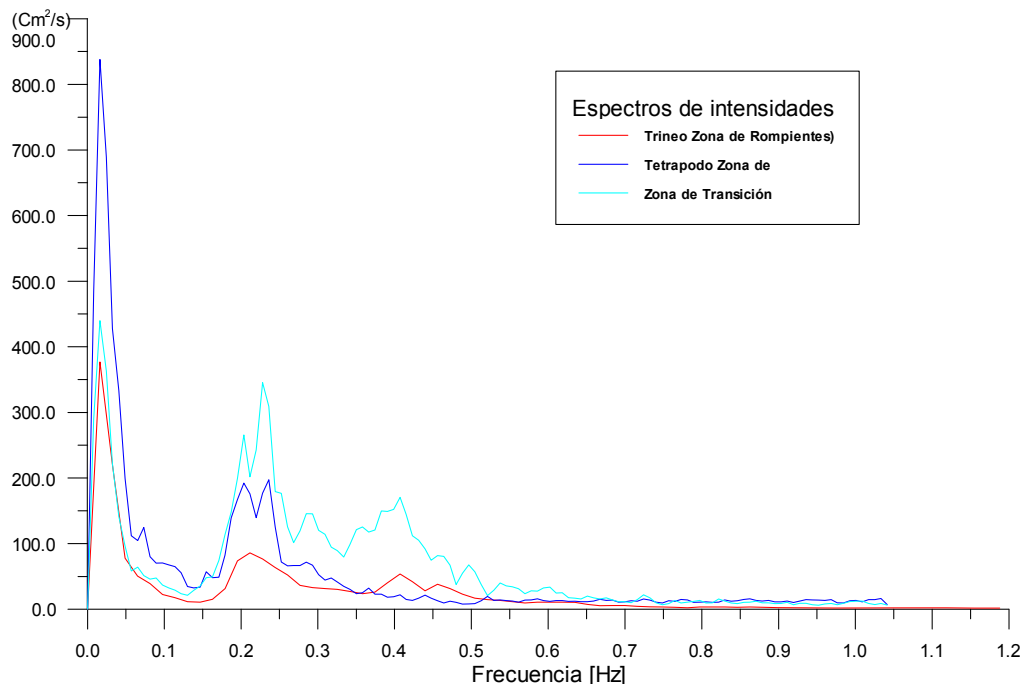


Figura 8-21. Comparación de los espectros en zona costera, de rompiente y de orilla.

La precisión en la obtención de las oscilaciones del agua en la zona de orilla es discutible. La digitalización de la imagen es muy “artesanal” y la calidad de las imágenes depende altamente del periodo elegido. Sin embargo, es una zona difícil de instrumentar, ya que el sensor de oleaje disponible trabaja con variaciones de 5 cm y el sensor de presión es difícil de colocar y calibrar.

La transformación del sensor de presión en altura de ola depende de un factor de corrección n de la Ec 7.1, con cuestiones todavía sin resolver, tales como la discontinuidad de n para la región de onda larga y el efecto de la amplitud finita. Según Hom-ma, Horikawa y Komori (1966) si se toma el término $\cosh kh$ como la unidad durante períodos de onda más cortas que 3 s, se llega a la conclusión de que para las ondas más cortas que 5 s la teoría ondulatoria de pequeña amplitud con el factor de corrección no son aplicables.

En los casos analizados en Delta 96, aunque el período es muy bajo, la comparación con los datos de laboratorio muestra un acuerdo bastante bueno entre ellos.

8.4 CIRCULACIÓN INDUCIDA POR VARIACIONES DE BATIMETRÍA

En el momento de la rotura la energía potencial se transforma en cinética. En el frente de la ola que rompe se forma una voluta, un remolino turbulento que atrapa aire en su interior. Debido a la entrada de aire en el remolino el frente brilla más y el entorno está más oscuro. Al avanzar rompiendo se disipa la energía cinética produciendo turbulencia. Por ello es un fenómeno muy visible, que se puede caracterizar mediante el análisis digital de imágenes.

Para cada test se realiza un promediado de la intensidad según un modelo on/off que asigna 1 cuando hay rotura y 0 cuando no, durante un tiempo de exposición de 10 minutos, con un snap shot (imagen instantánea) por segundo. De esta forma se estima la duración relativa de la rotura en cada punto. La suma de las longitudes de voluta L_r , con relación a la suma de las longitudes de onda del oleaje L , nos dan un coeficiente (L_r/L) para dos tipos de modelos de disipación: uno paramétrico y otro probabilístico.

La **aproximación paramétrica** parte de un área de rotura en función de la energía de voluta según la forma. Para deducirse el área de voluta A de la densidad de energía de voluta $E_r = 1/2 \rho c^2 A/L$ implícitamente se debe conocer su distribución. Por otro lado, la E_r está relacionada directamente con la disipación de la energía del oleaje organizado.

$$\frac{L_r}{L} \approx \frac{A/H_r}{L} = \frac{2E_r}{\rho c^2 H_r} \quad \text{Ec. 8-11}$$

Para despejar la incógnita de la altura de ola de rotura H_r de la expresión se debe modelar el área de voluta A . Para ello se debe adoptar alguna hipótesis:

- Asumir una forma de voluta constante $H_r/L_r = k$ (Longuet-Higgins y Turner 1974), es decir la H_r crece proporcionalmente a la distancia entre crestas, y como $L = c T$ se obtiene:

$$\frac{L_r}{L} = \sqrt{\frac{2E_r}{k\rho c^2 L}} = k' \sqrt{E_r/c^3} \quad \text{Ec. 8-12}$$

- Con H_r constante domina el proceso de entrada de aire (Longuet-Higgins 1974). Esta entrada sólo se produce si la turbulencia de la superficie libre tiene suficiente energía para vencer la tensión superficial, de forma que los

remolinos se proyectan hacia fuera atrapando burbujas de aire. Las inestabilidades locales se relacionan con efectos de capilaridad independientemente de la altura de ola y escala de profundidad. Como la tensión superficial no varía a lo largo de la superficie libre, se forma una capa de espuma de grosor constante H_r . Por tanto, el parámetro físico para la correlación de L_r/L es E_r/c^2 .

En las imágenes, si la intensidad de un píxel I es distinta de cero indica que en ese punto se ha producido rotura o que se ha propagado hasta alcanzar este punto. La voluta es visible tan sólo la fracción de tiempo igual al porcentaje de superficie de ola cubierta por la rotura, es decir L_r/L . La probabilidad de observar rotura ($I > 0$) en el punto x de una ola H es la suma de las probabilidades de que rompa en el punto x o un Δx antes:

$$I(x, H) = \sum_{x_i=x-\Delta x}^{x_i=x} P(H(x_i) = H_m(x_i)) P(L_p > (x - x_i)) \frac{L_r}{L} \quad \text{Ec. 8-13}$$

$P(H(x_i))$ es la probabilidad de que en el punto x_i se dé una altura de ola H ,
 L_p es la longitud que persiste tras la rotura,
 H_m es la máxima altura de ola local limitada por la profundidad.

El modelo probabilístico necesita mucha información:

- La forma de la rotura para estimar el porcentaje cubierto por espuma, sus variaciones espaciales y temporales.
- La longitud de persistencia de la rotura. Lippman y Thornton (1994) desarrollaron una expresión en función de la asimetría del oleaje y la energía E_r a distintos calados, normalizada por la longitud de onda L . Sin embargo no es aplicable, pues fue deducida para un caso muy simplificado.
- Un modelo on/off cuya intensidad resultante dependa de la altura de rotura, tipo de rotura y otros parámetros. Esto supone complicadas funciones y la expresión L_r/L .

Vistas las consideraciones anteriores, en el estudio se adoptó la aproximación paramétrica con una H_r constante en toda la zona de surf y por tanto se tomó E_r/c^2 como parámetro físico.

Para transformar la intensidad en el parámetro físico E_r/c^2 se deben realizar cuatro operaciones de “escalado”:

- Una eliminación de la tendencia. A menudo se produce un gradiente de intensidad $\psi_I(\mathbf{x})$ sobre toda la pantalla debido al ángulo de incidencia de la luz y a condiciones atmosféricas, de forma que se desvía el perfil de intensidad. En general, se adopta una corrección lineal basada en una línea de referencia en aguas profundas.
- Una corrección base. Fuera de la zona de surf los valores de intensidad después de eliminar la tendencia son distintos de cero debido a la presencia de una luz de fondo; para eliminarlo se ha de restar la intensidad de base o fondo I_{base} , el mínimo.
- Escalado de las intensidades. La intensidad base tiene valores entre 0 y 1 y debe multiplicarse por un factor de escala SF, de forma que el área bajo la curva sea la misma que bajo la de $E_r/c^2 \approx \rho H_s^3/8^2$. En el modelo se estima como $H_{\text{sig}}/H_{\text{máx}}$ en el contorno, el fondo, pues E_r/c^2 es una variable adimensional.

- Un ajuste vertical del perfil de intensidad tal que la intensidad en el contorno I_b , de aguas profundas, se ajuste a $(E_r/c^2)_b$. Como esto descompensa el área bajo la curva, debe variarse el **SF** iterando hasta que coincidan.

Estas cuatro operaciones se pueden sintetizar en la siguiente transformación:

$$F[I(x)] = SF[I(x) - \psi_l(x) - I_{base}] \quad F[I_b] = (E_r/c^2)_b. \quad \text{Ec. 8-14}$$

El modelo de propagación UNIBEST-TC simula la distribución espacial de distintas variables hidrodinámicas. Está basado en las ecuaciones de Battjes (1975) y de Battjes y Jansen (1978). Necesita ser alimentado con una batimetría, nivel de marea, oleaje en aguas profundas (H_{rms} , T_s , dirección). Da la distribución espacial a distintos tiempos del oleaje, corrientes y características del transporte de sedimentos como la altura de ola H_{rms} , celeridad de fase c , fracción de olas rotas Q_{sl} , disipación del oleaje D_w , disipación por rotura D_{iss} , energía de rotura E_r , E_r/c , E_r/c^2 .

El modelo MONIMORPH comprende las ecuaciones inversas de UNIBEST-TC. Éste se basa en la distribución transversal de E_r/c^2 derivada del escalado de las intensidades para determinar la correspondiente elevación del fondo.

Por otro lado, promediando la zona de rotura se pueden identificar irregularidades en la batimetría. En Delta 96 se identificó una rotura que parecía ser la causa o efecto de la existencia de la corriente de retorno constatada por la trayectoria que describían las boyas (Figuras 8.22 y 8.23).

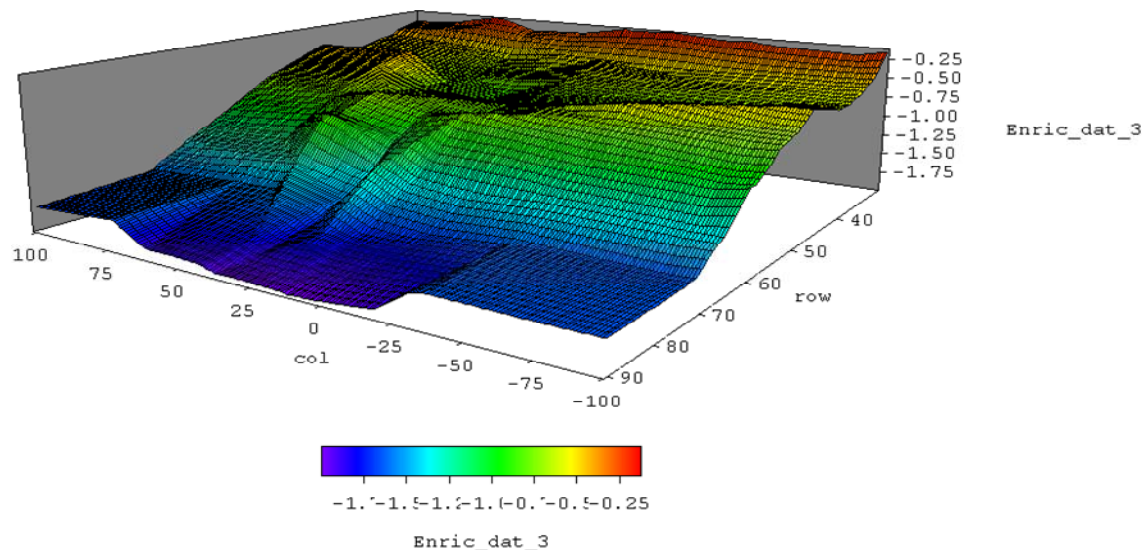


Figura 8-22. Batimetría 3D.

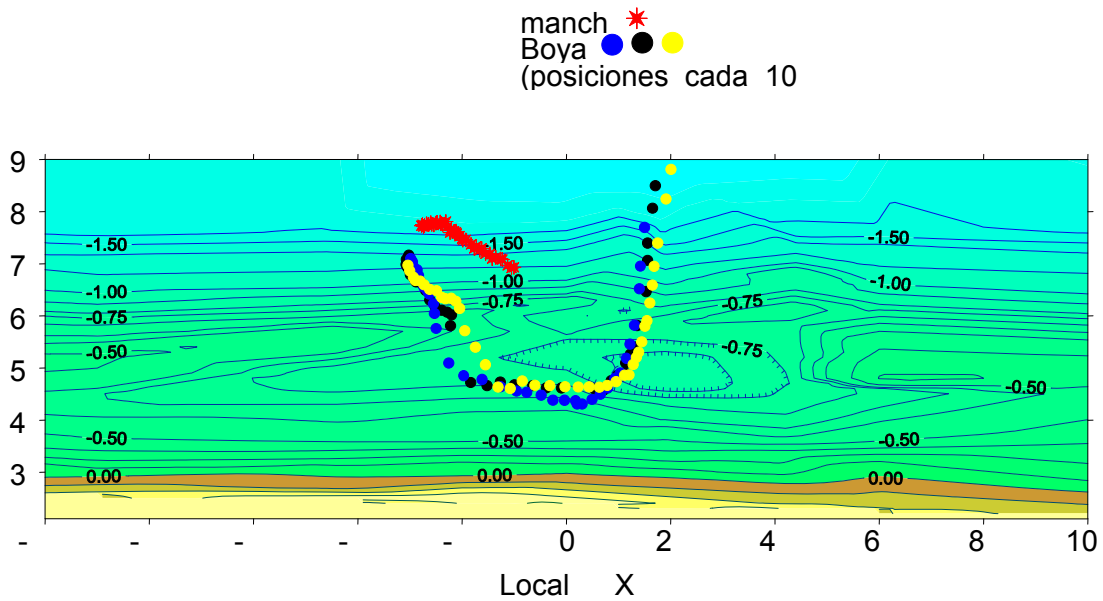


Figura 8-23. Batimetría bidimensional con la trayectoria de las boyas.

Para comprobar que la morfología era la desencadenante de la corriente se realizó una simulación numérica con los programas PROPS y CIRCO. Los resultados obtenidos se pueden ver en las figuras 8.24 y 8.25 (Sierra et al. 1998).

La existencia de una barra de arena provoca un peralte del oleaje por setup que no se da donde la barra aparece rota. Este gradiente de altura de ola induce corrientes necesariamente por conservación de flujo.

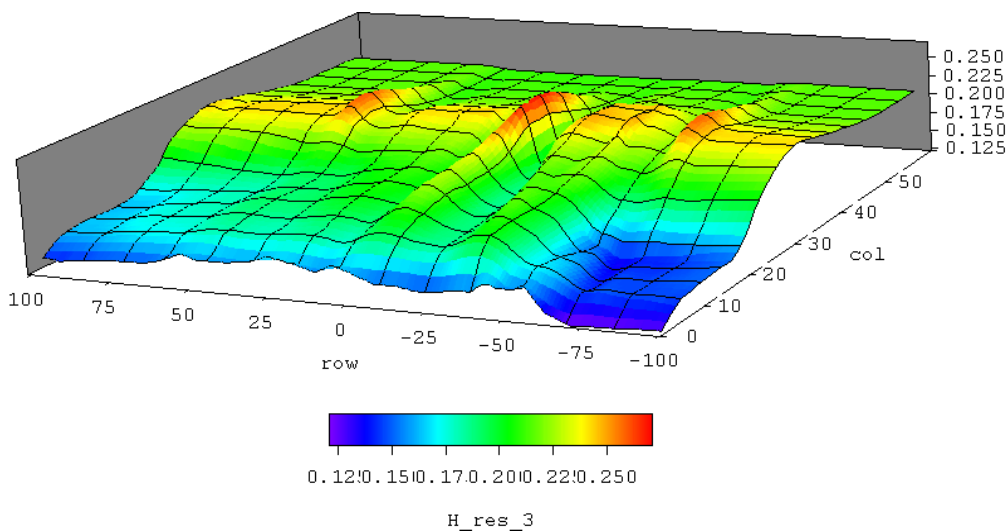


Figura 8-24 Simulación de la altura de ola máxima en cada punto.

En la simulación de corrientes se observan celdas del mismo tipo de la que reflejan las boyas, inclusive se pueden seguir éstas con los vectores de velocidad, aunque este resultado debe tomarse prudentemente.

Dado que la orilla presentaba una morfología rítmica, cabe pensar que las celdas se repetían secuencialmente a lo largo de la playa, tal y como reproduce el modelo, dando lugar a la formación de beach cups.

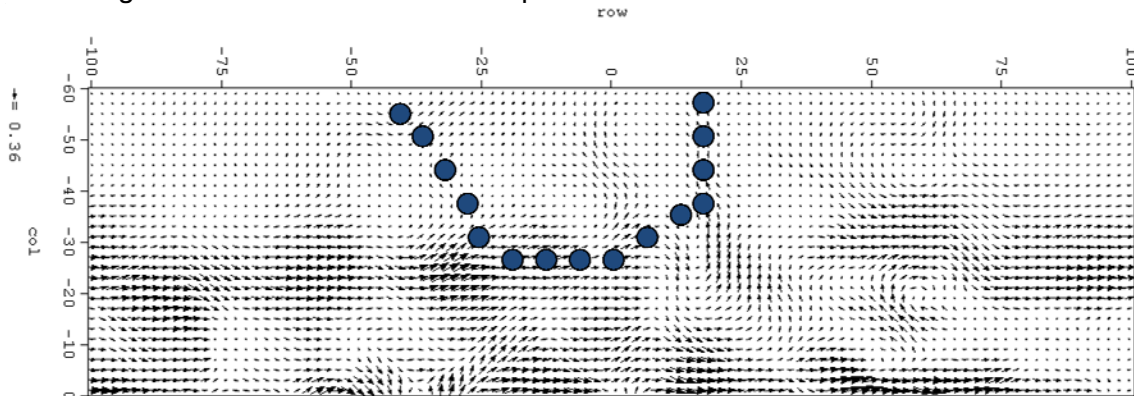


Figura 8-25. Simulación de la velocidad horizontal verticalmente integrada.

8.5 DETECCIÓN DE CONTAMINACIÓN

La contaminación se puede clasificar en dos grupos según los efectos producidos:

Vertidos que pueden matar directamente organismos marinos:

- Recubrimiento y asfixia de crustáceos.
- Envenenamiento por contacto directo o ingestión (plantas y pájaros).
- Exposición a compuestos de petróleo solubles en agua (peces e invertebrados).
- Destrucción de las formas juveniles más sensibles (larvas y huevos).
- Alteraciones corporales por insolación en animales de sangre caliente (pájaros buceadores).

Efectos indirectos perjudiciales:

- Destrucción de las fuentes de alimentación.
- Efectos sinérgicos que reducen la resistencia o producen estrés.
- Incorporación de sustancias cancerosas y mutagénicas.
- Reducción de la eficacia reproductiva.
- Alteración de órganos esenciales para la supervivencia, reproducción o alimentación.

Tal y como ocurre en medicina, la mejor forma de curar es prevenir. Existen medidas preventivas para disminuir el riesgo de vertido debido a accidentes de petroleros, operaciones de limpieza, carga y descarga u otras causas. Sin embargo, a menudo se enfrentan a un coste adicional que enfrentan los intereses ecológicos y comerciales.

De las técnicas para eliminar las manchas de petróleo en el mar, se ha demostrado que el uso de dispersantes produce daños tan perjudiciales como el propio vertido. Por otro lado, el uso de bacterias puede tener efectos secundarios no estudiados, especialmente en mares cálidos. En consecuencia, los métodos de extracción mecánica son los más usados.

Por lo tanto, hay que intentar conocer cada vez más todos los factores que influyen en el vertido y los procesos que sufre dicho vertido para mejorar su eliminación y disminuir los efectos que pueda producir. El grado del impacto depende principalmente de los siguientes parámetros:

- La dosis de petróleo vertida al medio.
- La naturaleza física y química del vertido.
- La localización del derrame.
- La época del año en que se produce (estado vegetativo de los organismos).
- Las condiciones ambientales predominantes (agitación y corriente).
- Las técnicas de limpieza empleadas.

Por otra parte, se han desarrollado procedimientos de control para hacer un seguimiento preciso de manchas de hidrocarburo mediante un satélite que proporciona imágenes por radar, o bien gracias a imágenes de infrarrojos. Esto permite conocer la posición de la mancha en cada instante e incluso en situaciones meteorológicamente adversas o durante la noche, lo cual es muy importante para poder coordinar adecuadamente las operaciones de actuación a realizar.

Es sorprendente que, de las imágenes SAR analizadas (Figura 8.26), el 72.6% detectasen vertidos de petróleo de tamaños entre 1 y 100 Km².

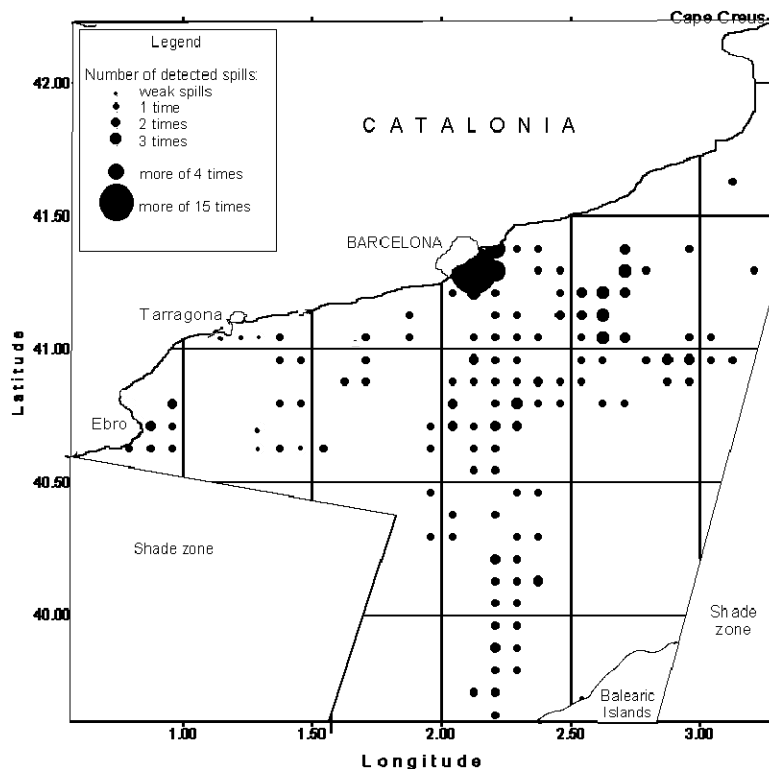


Figura 8-26. Vertidos en imágenes S.A.R.

En las imágenes SAR se confirma que es mucho mayor la cantidad de petróleo vertida en los mares litorales Europeos y detectada durante los dos años del programa europeo CLEAN SEAS que la parte proporcional estadística debida a todos los accidentes en los últimos 30 años, incluyendo el del Erika en 1999.

Se cumple la Ley de Zipf (Zipt 1949), que indica que la frecuencia de la ocurrencia de algunos eventos asociados con las actividades humanas es mucho mayor a escala pequeña que a gran escala, según una ley de dependencia hiperbólica en la escala logarítmica – lineal como puede verse en la figura 3.11 obtenida por Redondo y Platonov (2009).

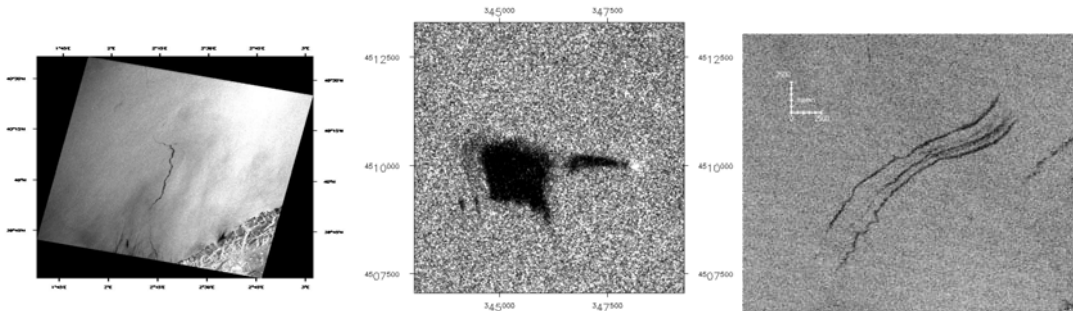


Figura 8-27 Ejemplos de manchas detectadas.

Al comparar el índice de contaminación por hidrocarburos de 709 imágenes SAR en aguas europeas con las 5029 imágenes del ERS-1 y 2 entre las imágenes del Océano Índico y Pacífico analizados por Lu (2003), parece que las aguas europeas son menos contaminadas pero con mayor frecuencia. Sin embargo hay que tener en cuenta el nivel de oleaje y viento local para la detección de manchas. Por ejemplo, los fuertes vientos (media 5,7 m/s con un fuerte sesgo) y las olas en la zona del Mar del Norte hacen más difícil su detección.

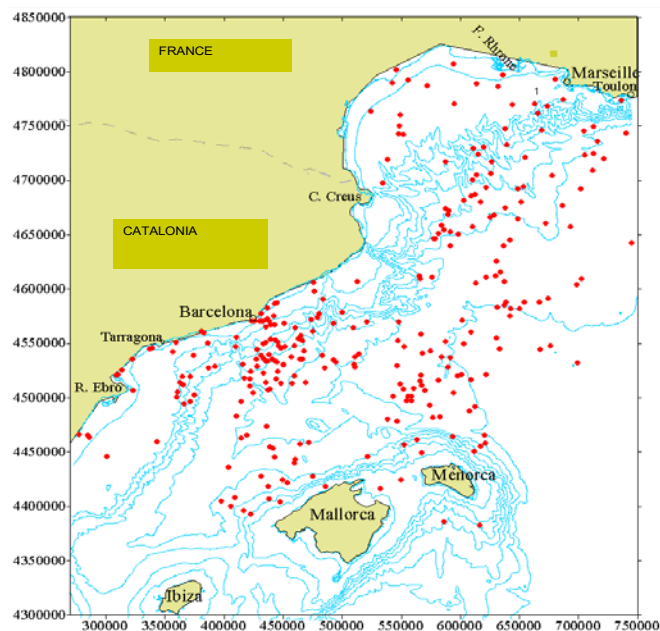


Figura 8-28. Detección de vertidos en el Mediterraneo Occidental

Por otro lado, los derrames de petróleo detectados por satélite que corresponden a pequeños accidentes en alta mar, la escorrentía y las aguas de lavado de los tanques de los buques y de lastre en alta mar son tan importantes como los mayores desastres ambientales.

La persistencia y grado de contaminación de los hidrocarburos suponen un serio peligro para el ecosistema marino y cuantiosas pérdidas si llegan a la costa, aunque la presencia continua de bajas concentraciones de hidrocarburos puede tener un efecto acumulativo. La divulgación de esta técnica de detección de vertidos de hidrocarburos mediante análisis de imágenes SAR, junto con alguna medida ejemplar serviría de medida coercitiva.

La difusividad turbulenta superficial es anisotrópica, pero se puede estimar de forma global a partir de la variación del área del orden de $50 - 300 \text{ m}^2/\text{s}$, para derrames de tamaño de unas decenas de kilómetros.

Se han analizado los resultados por las fechas del año y se puede ver que hay un cierto comportamiento estacional, como se puede ver en la figura 8.29.

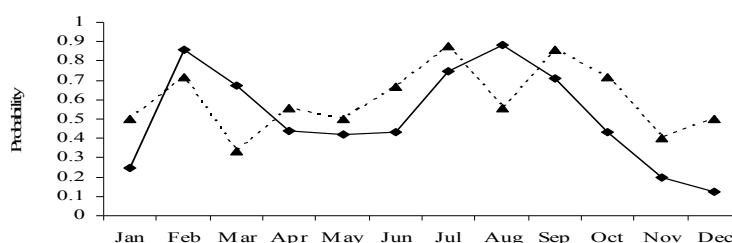


Figura 8-29. Comportamiento estacional del número de vertidos.

La eficacia de mezcla es un factor importante en la determinación de la tasas de mezcla de muchos flujos. Para obtener mejores estimaciones con las circunstancias reales es importante tener en cuenta la eficacia en la mezcla al modelar numéricamente y predecir con exactitud el complejo comportamiento de los flujos con gradientes de densidad, como muchos de los flujos industriales y ambientales (por ejemplo, los gases en atmósfera densa, la mezcla en el interior del océano, los efectos de la rotación, dispersión, etc.).

Los resultados de la campaña Delta 93 fueron utilizados para validar el análisis. Los resultados de tres días con las condiciones de mar muy diferentes. Se compararon medidas de corriente longitudinal y de dispersión. También se analizaron los resultados del Laboratorio de Ciencias do Mar de la Universidade Federal do Ceará.

La comparación entre las características lagrangianas (referencia móvil) y Eulerianas (referencias absolutas o coordenadas fijas) de los flujos de dispersión turbulenta son importantes (Redondo y Castilla 1994) cuando se utilizan boyas de seguimiento para estimar la difusión, ver Castilla y Babiano (2006).

8.6 CARACTERIZACIÓN DE LA VORTICIDAD EN EL MEDITERRANEO NOROCCIDENTAL

La compleja dinámica regional de las aguas superficiales también se manifiesta en las imágenes SAR por medio de múltiples estructuras superficiales de origen natural que indican la presencia de vórtices y otras estructuras dinámicas en la superficie del mar.

El área con mayor concentración de estructuras dinámicas asociadas a los vórtices y a la cizalladura horizontal del agua, se encuentra cerca del cañón submarino de Blanes. Otras áreas de relativamente alta frecuencia de detección de estructuras dinámicas están situadas cerca de las Islas Baleares y en el litoral de Tarragona.

La orientación espacial de las elipses ajustadas a los vórtices fue determinada mediante el ángulo entre la dirección Norte y la dirección del eje mayor.

Debido a su distribución binormal (figura 8.27), se considera que existen dos tipos de mecanismos-orientadores de los vórtices:

- Dinámico, debido a la influencia de la corriente Liguro-Provenzal (cerca de 50% de vórtices detectados tienen el ángulo de la orientación entre 25° y 75°).
- Batimétrico, por causa de la influencia de los cañones submarinos orientados perpendicularmente a la línea de la costa (en 25% de los casos los vórtices detectados tienen ángulos acimutales entre 125° y 145°).

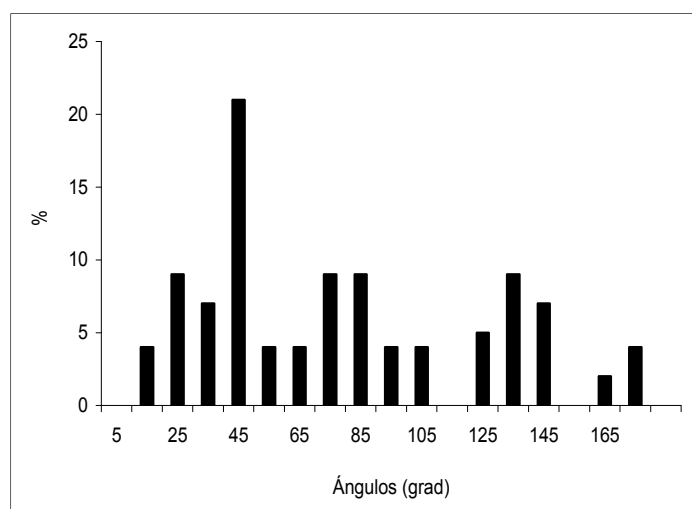


Figura 8-27 Histograma normalizado de los vórtices en función del ángulo de la dirección principal respecto al norte en el sentido de las agujas del reloj. Redondo y P. 2009

En el Mediterráneo Noroccidental han sido detectados in situ remolinos y filamentos espirales por observación remota mediante diferentes proyectos de investigación. En Tintorè et al. (1990) mediante imágenes de satélite en infrarrojo muestran los resultados de la detección y medidas in situ de los remolinos anticiclónicos de aguas frías y poco saladas en el límite de la plataforma continental cerca de Barcelona. Se calcula mediante el método dinámico la estimación de la velocidad de la corriente geostrofica (respecto a una profundidad de 200 m), la velocidad característica de la rotación anticiclónica de un vórtice típico (~20 cm/s). También se monitoriza durante

cuatro días el desplazamiento de un frente de aguas frías y se calcula la velocidad media de su deriva a lo largo de la costa de Barcelona que alcanza unos 25 cm/s.

Font et al. (1993), indicaron la existencia de un remolino en mesoescala al Sur del Cap de Creus y un dipolo entre las Islas Mallorca y Menorca por las trayectorias de las boyas en deriva.

Rojas et al. (1995), en el proyecto MECA 93, mediante imágenes del SAR detectaron vórtices ciclónicos de 5 km de diámetro al sudoeste de los cañones submarinos de Blanes y Palamós y de 20 km de diámetro al norte del Golfo de Roses. También las formas circulares de las trayectorias de las boyas en deriva muestran la existencia de un gran vórtice de carácter anticiclónico cerca de la Costa Brava. Las aguas relativamente frías y de baja salinidad procedentes del Golfo de León crean campos de gradientes horizontales de densidad y de flujos locales detectados en la plataforma continental. La interacción entre estos flujos y la compleja topografía del fondo (los cañones submarinos) tiene un papel principal en la formación de las corrientes costeras y los remolinos.

Tintoré et al. (1990), indican no obstante, la circulación de los vórtices desde la plataforma continental hacia alta mar está asociada con el transporte de material en suspensión (clorofila y especies de plancton).

Allen (1988) demostró teórica y experimentalmente la deflexión hacia mar adentro de vórtices baroclinos costeros, al encontrar una diferencia de profundidad, y en Chen y Allen (1996) se detalla la influencia de las características del cañón submarino en el flujo transversal a la costa.

En el caso del cañón de Blanes, el modelo numérico de Arduin et al. (1999) también muestra la deflexión mar adentro de los vórtices baroclinos. También se han detectado vórtices elípticos parecidos en las corrientes marinas superficiales. Sus fuertes dependencias de batimetría local (por ejemplo en la zona del cañón submarino del Foix que está situado al Sudoeste de Barcelona), fueron detectadas en la campaña MEGA 93 (Rojas et al., 1995), y en modelos numéricos de la zona (Canals et al., 1997). La extensión de la mayoría de los remolinos (78 %) es menor de 100 km².

En los remolinos detectados cerca de Barcelona (Platonov 2001), el tamaño máximo coincide notablemente con el límite impuesto por el radio de deformación de Rossby Rd con una estratificación termoclina (h), entre 10-320 km:

Radio de Rossby	$Rd = (N/f)h$	Ec. 8-15
------------------------	---------------	-----------------

N frecuencia de Brunt-Vaisalla	$N^2 = \frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z}$	Ec. 8-16
---------------------------------------	---	-----------------

f es la fuerza de Coriolis	$f = 2\Omega \sin \vartheta$,	Ec. 8-17
-----------------------------------	--------------------------------	-----------------

Ω es la velocidad de rotación de la tierra

ϑ es la latitud

Se considera que los vórtices grandes no son estables por dos razones:

- La estabilidad de los vórtices depende del radio de deformación de Rossby, determinado en función de los términos de empuje mediante la frecuencia de Brunt-Väisälä N y de la frecuencia inercial, dada por el parámetro de Coriolis. Si el radio del vórtice es mayor que el valor calculado del Rd, éste es inestable y se rompe en otros menores.

- La vorticidad local a pequeña escala (< 5 km) generada por la batimetría compleja de la zona así como la fricción costera, parece desestabilizar a los grandes vórtices, que son advectados por la corriente Liguro-Provenzal.

Las medidas en el Mediterraneo son hasta dos órdenes de magnitud inferiores al Pacífico, debido a que se pueden desarrollar con remolinos mayores, según el radio de Rossby, y por tanto la difusión es mucho mayor.

Es posible generar mapas de difusividades temporales y espaciales a partir de la información obtenida por satélite como puede verse en la figura 8.28. (Jolly et al 2001). De forma dimensional solo hay que buscar una escala local relevante de velocidad y una de longitud dependientes de la posición y el tiempo $L(x,y,t)$ y $V(x,y,t)$ para que al multiplicarlas resulte un coeficiente de difusión $K = L \cdot V$. Una posibilidad mas sencilla es usar la medida de una escala integral calculada a partir de las correlaciones espaciales de imágenes de satélite, esta correlacion puede efectuarse con imágenes de visible, infrarojo, clorofila, etc. Con la hipótesis de que las escalas espaciales de cambio de la velocidad seran similares a las de cambio del escalar (iluminación, temperatura o color) detectadas. En el caso de la figura 8-28 se utilizaron escalas integrales de imágenes SAR (o de rugosidad de la superficie del oceano) que debido a las inestabilidades de Langmuir permiten detectar muy bien la distribución de remolinos superficiales Redondo y Platonov (2001), Matulka (2010), la escala temporal usada es sencillamente la inversa del parametro de Coriolis.

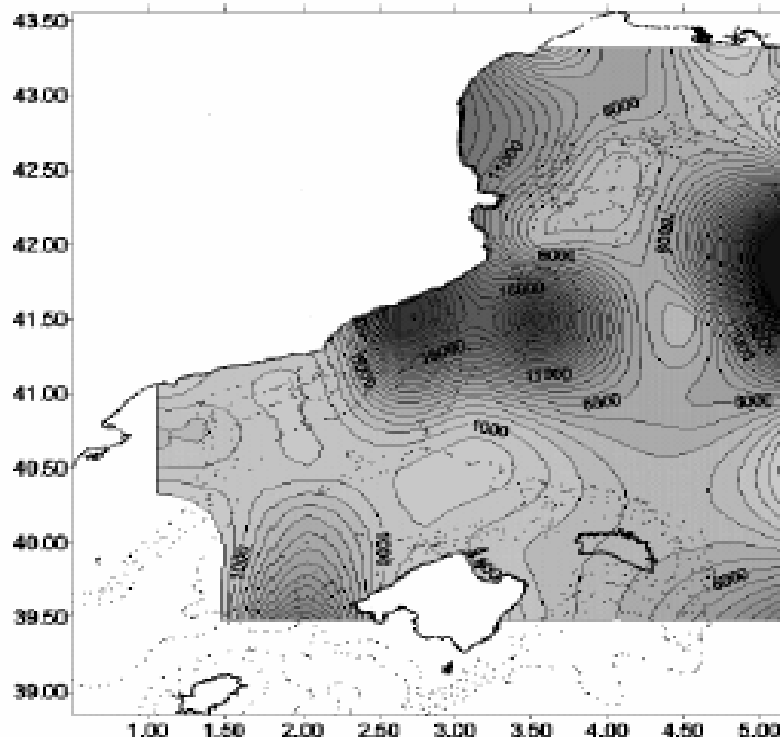


Figura 8-28 . Mapa 2D de difusión turbulenta obtenido de estimaciones locales de la escala integral de imágenes SAR

8.7 DEPENDENCIA DE LA INTERMITENCIA Y FRACTALIDAD: LEY DE RICHARDSON GENERALIZADA.

En el proceso 3D de remolinos turbulentos, tipo cascada Kolmogorov, permite la aparición de una intermitencia, que esta distribuida de forma fractal entre las diversas escalas correspondientes al tamaño de los diversos remolinos, según (Jou 1997), Redondo et al.(2008) y Frish(1995) se puede asumir la localidad de los procesos de transferencia local, esto es:

- Las propiedades de la jerarquía de remolinos a una escala determinada sólo dependen de la disipación local de ese tamaño ε_L , a esa escala L
- Existe un "rango de inercia" intermedio de los remolinos o $L \gg L_\nu \gg L_\eta$ dónde la viscosidad no juega ningún papel. En este rango, todas las propiedades deben ser determinados por ε (al menos en un rango de escalas, pero manteniendo una homogeneidad menos restrictivas y una visión local respecto a la intermitencia).
- En la practica tal como esta descrito en Mahjoub(2001), Mahjoub et al (1998) la no-homogeneidad puede confundirse con la intermitencia, y la variabilidad espacial y temporal pueden entremezclarse.

Se puede describir la velocidad característica $v(L)$ para remolinos de tamaño L depende de L . Puesto que las dimensiones de ε son de velocidad/tiempo:

$$v(L) \approx (\varepsilon L)^{1/3} \quad \text{Ec. 8-18}$$

Y por lo tanto la distribución fraccionada de la energía por unidad de masa y la longitud será.

$$E(L)(dL/L) \approx v(L)^2(dL/L) \approx (\varepsilon L)^{2/3}(dL/L) \approx \varepsilon^{2/3} L^{-1/3} dL \quad \text{Ec. 8-19}$$

que conduce a la tradicional ley espectral de Kolmogorov de los 5/3

$$E(k)dk \approx \varepsilon^{2/3} k^{-5/3} dk \quad \text{Ec. 8-20}$$

Es de suma importancia estudiar la estructura de la turbulencia en la difusión, por lo que si se supone que $v(L) \approx L^\xi v(L) \approx L^{\xi-1}$, con ξ a un exponente de escala. Paladin y Vulpiani (1987) entre otros, han demostrado que los momentos de la distancia relativa R entre un par de partículas se escala con el tiempo como

$$\langle R^{2q} \rangle \approx t^{2q(1-\xi)} \quad \text{Ec. 8-10}$$

Como consecuencia, el valor medio del cuadrado del desplazamiento R como una función del tiempo a largo plazo.

$$\langle R^2 \rangle \approx t^{2/(1-\xi_1)} \quad \text{Ec. 8-22}$$

El tipo de difusión clásico browniano es mayor, y también según Richardson (1925), con el exponente 1/3 asociado a la escala de Hurst

Ec. 8-23

$$\langle R^2 \rangle \approx t^3$$

El hecho de que la disipación no es constante, asumida en Kolmogorov K41, y que además se escala espacialmente lleva a una definición más general K62 de los máximos exponentes de escala de las funciones de estructura de modo que ahora $\zeta_p = f(h, p)$ y no sólo $\zeta_p = hp = p/3$.

Ec. 8-24

$$\langle v(L)^p \rangle \approx L^{p/3} \langle \varepsilon(L)^{p/3} \rangle \approx L^{\zeta_p}$$

Tal como detalla Frish(1995) la primera teoría que predice los máximos exponentes de la función de estructura, fue de hecho dada también por Kolmogorov en 1962, con la contribución de Obukhov, basándose en las críticas de Landau, esta teoría se basa en abandonar la distribución normal o de Gauss, asumiendo que es de forma log-normal como se comporta la función de distribución de probabilidad de la disipación

Ec. 8-25

$$\Pr[\ln \varepsilon(x)] \approx \exp \left[-\frac{(\ln \varepsilon(x) - \langle \ln \varepsilon(x) \rangle)^2}{2\mu} \right]$$

Y esta nueva constante describe la intensidad de la fluctuación de la disipación en una escala de tiempo logarítmica es lo que actualmente se conoce como el parámetro de **intermitencia**, este parámetro se ha medido para turbulencia homogénea isotrópica estacionaria dando valores en el rango de 0,2 a 0,6; pero la turbulencia de las situaciones reales parece mucho más complicado como se comenta por Mahjoub et al (1998)

Ec. 8-26

$$\langle \partial \varepsilon(r) \partial \varepsilon(r+L) \rangle \approx \langle \varepsilon^2 \rangle (L/L_0)^{-\mu}$$

Con esta teoría, los exponentes de escala que dependen tanto de p y el parámetro de intermitencia, por lo que la expresión para el orden p de la función de estructura de la velocidad será:

Ec. 8-27

$$\langle v(L)^p \rangle \approx L^{p/3} L^{\mu p(3-p)/18}$$

Y la expresión de los espectros de energía en función del número de onda modifica la ley K41 de cascada no intermitente 3D dada por los 5/3 como:

Ec. 8-28

$$E(k) \approx \varepsilon^{2/3} k^{-5/3-\mu/9}$$

De manera similar, la superficie media de un derrame o una pluma de un trazador se modifica por la intermitencia

$$\langle R^2(t) \rangle \approx t^{51/(18-\mu)} \quad \text{Ec. 8-29}$$

La expresión general de la función de estructura os en escala exponencial es:

$$\zeta_p = \frac{p}{3} + \frac{\mu}{18} p(3-p) \quad \text{Ec. 8-30}$$

Si usamos la relación entre la dimensión fractal (o más exactamente el máximo de las medidas multifractales que describen los contornos de disipación) se puede relacionar con la intermitencia siguiendo el argumento en un flujo estratificado dado por Redondo (1990) o Jou (1997), si cada remolino se divide por dos en un proceso de cascada turbulenta:

$$L(n) = L_0 2^{-n} \quad \text{Ec. 8-31}$$

Podemos relacionarlo con la definición geométrica (o topológica) de la dimensión fractal calculada mediante el método de “box counting”

$$N(n) = N_0 2^{Dn} \quad \text{Ec. 8-32}$$

El volumen en la etapa “n” de generación n de una cascada de vórtice intermitente es.

$$V(n) = N(n)L(n)^3 \approx N_0 L_0^3 2^{-(3-D)n} \quad \text{Ec. 8-33}$$

Con un ratio de volumen de una generación de remolinos a la siguiente que puede expresarse como:

$$\beta(n) = V(n)/V_0 = 2^{-(3-D)n} = [L(n)/L_0]^{3-D} \quad \text{Ec. 8-34}$$

Si aplicamos la definición de la disipación, podemos expresarla en función del volumen no ocupado por los remolinos que sería la consecuencia espacial a diversas escalas de la intermitencia.

$$\varepsilon \approx \beta(n)v^3(n)\tau^{-1}(n)v(n) \approx [\varepsilon L(n)\beta^{-1}(n)]^{1/3} \quad \text{Ec. 8-35}$$

Por tanto el espectro sera

$$E(n) \approx \beta(n)\varepsilon^{2/3} [L(n)/\beta(n)]^{2/3} \quad \text{Ec. 8-36}$$

$$E(k)dk \approx \varepsilon^{2/3} k^{-5/3} [kL_0]^{-(3-D)/3} dk \quad \text{Ec. 8-37}$$

Y para la expresión de las funciones de estructura de la velocidad en función de la escala:

$$\langle v(L)^p \rangle \approx \varepsilon^{p/3} L^{\zeta_p} \quad \text{Ec. 8-38}$$

Y así se obtiene lo que se denomina el método Frish multifractal (1995) mas elemental popularizado por Frish (1995), así se relaciona el orden de la función de estructura p con la dimension fractal máxima asociada al campo de velocidades D .

$$\zeta_p = \frac{p}{3} + (3-p)\frac{(3-D)}{3} \quad \text{Ec. 8-39}$$

Si queremos estimar la difusión en un ambiente fractal, podemos sustituir la primera estructura por la función exponente de escala ($p=1$) quedando:

$$\zeta_1 = \frac{1}{3} + (3-1)\frac{(3-D)}{3} = \frac{1}{3}(7-2D) \quad \text{Ec. 8-40}$$

Si supone que es constante la fracción de energía que pasa de una escla a la siguiente, pero contiene en sí mismo una propiedad estadística de intermitencia, que se caracteriza por una distribución de probabilidad $P(\beta^n)$, donde los β^n son independientes y distribuidos como variables aleatorias. Este modelo se conoce como modelo β al azar. Los momentos de orden p de la velocidad en el modelo beta aleatorio serían

$$\langle v_n^p \rangle = \iiint dB_1 dB_2 \dots P(\beta_1 \beta_2 \dots) v_n^p \quad \text{Ec. 8-41}$$

Paladin y Vulpiani dieron una expresión sencilla de $P(\beta)$, para únicamente dos tipos de procesos de rotura. Una ruptura en láminas de vórticidad ($\beta=0,5$) y una ruptura estándar sin reducción de volumen que corresponde a $\beta=1$. La distribución de probabilidad bimodal, según ellos, asumen que tiene la forma:

$$P(\beta) = x\delta(\beta-0,5) + (1-x)\delta(\beta-1) \quad \text{Ec. 8-42}$$

con coeficientes δ ajustados experimentalmente. El límite de $x = 0$ se corresponde con el modelo estándar de Kolmogorov K42, siendo δ la delta de Dirac y x un parámetro que para $x=1$ se ajusta al modelo β . El valor de x que obtiene un mejor ajuste de los máximos exponentes de escala con los datos experimentales resulta ser $x \approx 0,125$. Con este valor de x , se obtiene un ajuste muy bueno para los exponentes de escala. Vale la pena mencionar que las características multifractales no tienen ningún efecto sobre las propiedades de difusión, sólo dependen de la ley de escala para el primer momento de la velocidad, que es prácticamente invariable por multifractalidad.

Hay varios métodos de obtener mapas de difusividad mediante imágenes. Para obtener una estimación más realista hay que tener en cuenta que la distribución espacial / temporal es no-homogénea (con intermitencias en el sentido de Kolmogorov 62 obtenida como las correlaciones espaciales de la disipación turbulenta, o de las funciones de la estructura) y estos valores se pueden utilizar para parametrizar tanto turbulencia de la superficie del mar como turbulencia atmosférica en una variedad de escalas. Es posible que diferentes dimensiones fractales se deban a diferentes niveles de intermitencia (y por tanto diferentes espectros, que no son necesariamente de inercia, ni en el equilibrio). Estas técnicas son útiles para proporcionar estimaciones más realistas de las variaciones espaciales y temporales de la dispersión horizontal en el medio ambiente, que reflejan la influencia de la distribución espectral de energía de

la difusividad local en términos de una Ley de Richardson generalizada Castilla et al (2007).

La influencia del oleaje en el coeficiente de dispersión ha sido poco estudiada y tratada brevemente en el estado del arte. Davidov (1989) sugirió que afecta de dos maneras: por medio del flujo de masa y por el aumento de los procesos turbulentos. Cuando una gota de trazador se libera en presencia de oleaje, se puede observar que el punto se mueve en el sentido de aproximación de la ola, con la máxima velocidad en la superficie y decreciendo con la profundidad. Además, las olas contribuyen con la turbulencia al aumento de los procesos de mezcla, como se puede ver en Masch (1963) hay una buena correlación del coeficiente de difusión horizontal y la corriente de superficie y el vector resultante de la velocidad del flujo oscilatorio u_m

Davidov (1989) mostró que la variación vertical de la componente de velocidad horizontal del flujo oscilatorio (u'_j) es otra fuente de energía turbulenta. El tratamiento teórico llevado a cabo por Davidov (1989) es una contribución general del oleaje en el transporte de contaminantes, sin tener en cuenta los efectos individuales de la turbulencia, las olas y las corrientes.

Zeidler (1976) realizó una serie de experimentos en el Mar Báltico en los que vió que el exponente de la evolución de la extensión del trazador en el tiempo era fuertemente dependientes de la distancia de la costa, según una relación del tipo:

$$\sigma^2 \propto t^{n(y)} \quad \text{Ec. 8-39}$$

Con el exponent $n(y)$ entre 2,3 y 1,2, exponentes de diffusion anómala, lejos de la Ley. de Richardson de los 4/3, según la cual el coeficiente de diffusion depende del tamaño a los 4/3:

$$K \propto \varepsilon^{1/3} \ell^{4/3} \quad \text{Ec. 8-40}$$

Lo que corresponde a una dependencia temporal del tipo.

$$\sigma^2 \propto t^3 \quad \text{Ec. 8-41}$$

Los experimentos de by Zeidler (1976) en un canal de oleaje muestran una dispersion homogénea para oleaje sin rotura sin corriente. Por ejemplo los coeficientes de diffusion longitudinal y transversal eran constantes (sus varianzas varían linealmente con el tiempo), dependiendo solo del Número de Reynolds del oleaje R_w :

$$R_w = \frac{a^2}{vT} \left(\sinh \frac{2\pi h}{L} \right)^{-1/4} \quad \text{Ec. 8-42}$$

Es un parámetro adimensional dónde a/T es la velocidad orbital.

En la publicación de Díez et al. (2008) adjunta como anexo 3 se muestran comparaciones con modelos numéricos en un amplio rango de valores.

Según Zeidler.(1976) se puede ver que la diffusion costera es mayor en condiciones de campo que en laboratorio, creciendo con el tiempo y con el tamaño del vertido inicial. En otras palabras, la dispersion por oleaje no es linealmente dependiente del tiempo, probablemente por la superposición de diferentes efectos como la diffusion

generada por el flujo oscilatorio, turbulencia generada por fricción de fondo de olas y corriente y la cizalla debida a gradientes espaciales del flujo medio. Los efectos originados por la interacción lineal y no-lineal entre oleaje y corrientes también deben tenerse en cuenta. Para estudiar todos estos efectos, se deben tomar medidas detalladas del campo de velocidad y de los episodios de mezcla.

Según los experimentos realizados en el Delta del Ebro descritos en el capítulo 6 y analizados por Mahoub 2000 podemos relacionar valores de las funciones de estructura con la difusividad de las manchas. Mahoub también compare una serie de experimentos realizados en el Báltico en la bahía de Knebel Vig en Dinamarca con un nivel de turbulencia mucho mayor.

A partir de medidas de velocidad a distinta profundidad los exponentes de la función de estructura de primer orden fueron entre 0,34 y 0,36 para el Delta del Ebro y entre 0,36 y 0,38 para el Báltico.

$$K \propto \varepsilon^{1/3} \ell^{H+1} \quad (\text{Ec. 8.43})$$

Como

$$H = \frac{1}{3} - \frac{3-D}{3} \quad (\text{Ec. 8.44})$$

Los casos con menor dimensión fractal tienen menor difusividad. Cuando pasa mucho tiempo se llena el espacio y se llega al valor límite de $K \sim l^{4/3}$. Con manchas de fractalidad que tienden a $D_3=2,4$ no se puede cumplir la Ley de Richardson $K \sim l^{4/3}$ y si se modifica por el hecho de que la disipación no es uniforme. La falta de uniformidad de la disipación de energía turbulenta se puede medir a partir de la dimensión fractal, dando una variación de la difusividad con la escala especial como:

$$K \propto \varepsilon^{1/3} \ell^{(D+1)/3} \quad \text{Ec. 8-39}$$

De la misma forma a partir del cálculo de las funciones de estructura de la velocidad turbulenta se puede poner

$$K \propto \varepsilon^{1/3} \ell^{\zeta_1+1} \quad \text{Ec. 8-39}$$

Con lo cual podemos relacionar los valores del exponente de Hurst H con el orden p de las funciones de estructura y con la dimensión fractal D, como según se ve en el apéndice $\zeta_p = Hp$ y en el caso de la difusión $\zeta_1 = H = (D-2)/3$.

Los valores medidos tanto en playas abiertas como en zonas confinadas dan valores de difusividad que dependen de la escala con exponentes entre 0,9 y 1,5.

Solo en los casos sin intermitencia y sin fractalidad ($D^3=3$) se cumpliría la Ley de Richardson.

A partir de las medidas de funciones de estructura en el Báltico y en el Delta del Ebro tenemos valores de dependencia de la difusividad con la escala con exponentes promedios de 1,35 en el Delta y 1,37 en el Báltico, ambos ligeramente superiores a la Ley de Richardson 1,33, lo que se correspondería a cierta hiperdifusividad. Por el contrario las medidas realizadas en playas confinadas y en el entorno del Puerto dan valores inferiores, entre 0,9 y 1,13. Es interesante resaltar que cuando la dimensión

fractal de las manchas a pequeña escala es de $D=2,4$ entonces la dependencia espacial de la difusividad tiende a 1,13.

También es importante resaltar la complejidad de la interacción no-lineal de los distintos agentes que producen difusión en el mar. Se comprueba que es posible que la intermitencia de la turbulencia pueda parametrizarse mediante medidas fractales y que el uso de momentos de orden superior ayuda a comparar medidas de difusión a distintas escalas mediante la Ley de Richardson Generalizada que relaciona la pendiente del espectro con la dependencia temporal de la difusión. Así se puede relacionar para los distintos forzamientos las relaciones entre el exponente Hurst, la pendiente del espectro, las funciones de estructura, y las distintas intermitencias a distinto orden.

En la figura 8.29 se comprueba la escasa correlación de los datos sin tratar de los distintos agentes forzadores en las medidas de difusión de trazadores en el puerto de Barcelona.

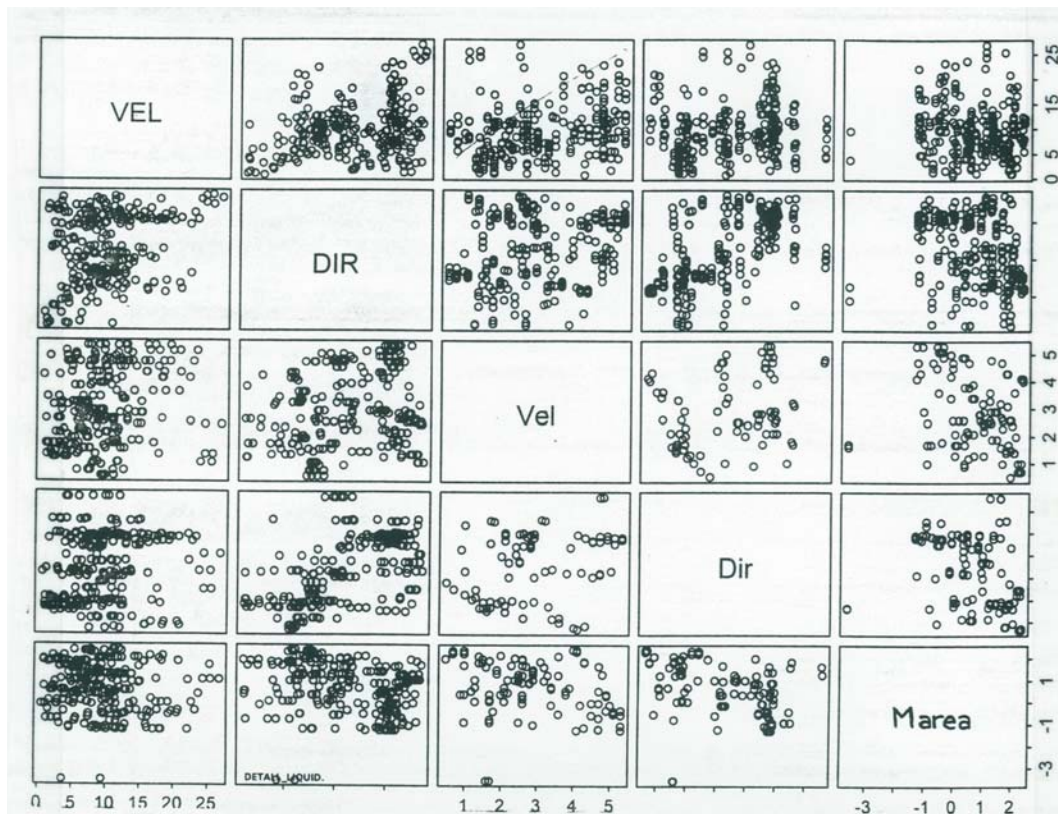


Figura 8.29. Correlaciones de los agentes forzadores en el puerto de Barcelona.

9 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

9.1 PRINCIPALES CONCLUSIONES

Entre las principales conclusiones de esta tesis, según los objetivos planteados, se destacan las siguientes:

Se han obtenidos numerosos parámetros de la caracterización experimental de los procesos de advección y difusión, en diferentes ámbitos de aguas costeras, con una buena estimación de los agentes forzadores, que pueden ser útiles para posteriores investigaciones. Este trabajo sintetiza el análisis de decenas de horas de vídeo y centenares de imágenes SAR de satélite. Se ha participado en campañas experimentales multidisciplinarias que han permitido caracterizar los diferentes agentes actuantes en la dispersión ambiental (oleaje, corriente, marea, viento, ...) de forma detallada. Al disponer datos de diferentes escenarios, con diferentes condiciones ambientales, a diferentes escalas se ha podido hacer una comparación de los mismos que permite generalizar resultados.

En cuanto al instrumental y metodología:

- Los sistemas de captación: el láser tiene una gran penetración y por ello se emplea mucho para el análisis de flujos; la estereofotogrametría es de alta precisión pero mayor complejidad, el video es un sistema simple y de gran versatilidad. El infrarojo permite visualizar calor.
- Las imágenes en blanco y negro ofrecen mayor resolución que las de color.
- Las resoluciones espacial y temporal determinan el instrumental necesario (frecuencia de muestreo, error medio, etc), la georeferenciación, el soporte del instrumental y su disposición, por lo que es básico definir a priori qué se quiere medir. Es importante tener en cuenta que todas las transformaciones en los bordes de la imagen pueden producir errores importantes, por lo que es recomendable no tener en consideración al menos el 10% periférico.
- Conviene, especialmente en experimentos de campo, tener una planificación detallada y capacidad de improvisación.
- Las imágenes promediadas permiten obtener valores medios con facilidad y las series temporales de una fila o columna obtener espectros. Así mismo el análisis fractal de los contornos permite distinguir el tipo de mancha (petróleo o algas)

El tratamiento digital de imágenes se ha validado como una técnica no intrusiva que permite obtener medidas simultáneas de una zona (no de un solo punto) y relativamente barata. Algunas de sus aplicaciones ya se han comercializado y han resultado ser sistemas útiles para la gestión de zonas costeras. Por ejemplo, para el análisis de la regresión de playas, la detección de corrientes de retorno en zonas de baño, caracterización del oleaje (dirección, frecuencia, altura, espectros de energía,..) y especialmente de la zona de swash, donde es difícil instalar sensores. Así se puede obtener la parametrización de los valores medios del oleaje (frecuencia, altura, peralte, dirección), su espectro de energía e incluso identificar alteraciones de la batimetría, como se ha visto. Se han desarrollado aplicaciones de técnica en numerosos campos de la ciencia y de la ingeniería: desde comportamiento de medios granulares, radares de velocidad, restauración de fachadas a dispersión de contaminantes.

Con las imágenes por satélite del radar de apertura sintética (SAR) se obtiene una imagen ficticia donde la intensidad es una medida indirecta de la rugosidad superficial.. Además presentan la ventaja de que permiten tomar imágenes de noche, con nubes, etc. El hecho de que las órbitas definan de forma regular el paso por las mismas zonas

permite hacer un estudio sistemático y a gran escala, ya que las imágenes abarcan un dominio kilométrico.

Del análisis de resultados cabe destacar:

Los coeficientes de difusión obtenidos en los experimentos presentan una dependencia característica con la escala temporal y espacial de los fenómenos predominantes. La distribución de una sustancia depende de la interacción de múltiples escalas, por lo que el estudio en distintos escenarios permite un análisis mucho más amplio. En este estudio se tomaron medidas de: la zona de rompientes en la barra del Trabucador (Delta del Ebro), estratificación de flujos en la cuña salina del Delta del Ebro, aguas confinadas en el puerto de Barcelona, mar abierto en el Mediterráneo Occidental.

La comparación de la evolución de las manchas en zonas de oleaje con o sin rotura muestra que los valores de los coeficientes de mezcla y de la anisotropía son mucho mayores en el caso con rotura que en el caso sin rotura. La rotura favorece claramente el proceso de mezcla debido a la turbulencia generada por ésta y que esta diferencia crece con el tiempo.

La ley de Richardson o de los 4/3, según la cual el coeficiente de dispersión es proporcional al tamaño de la mancha elevado a 4/3, no es directamente aplicable en la difusión en Zona de Rompientes, debido a que la rotura produce condiciones con un subrango inercial pequeño y en cambio se verifica su dependencia del tamaño de la mancha. En la zona de rompientes presenta una fuerte dependencia del punto de vertido, con un máximo en la zona intermedia entre la orilla y la rotura.

Según Zeidler (1976) debe haber un crecimiento del coeficiente de difusión K_i aproximadamente lineal para valores altos del número de Reynolds entre 10^3 y 10^6 ; sin embargo los resultados no confirman esta ley, pues en los experimentos de Recife, Delta y Puerto de Barcelona había otros efectos más importantes como marea, corrientes, viento y condiciones de contorno, que producen estiramientos por cizalla.

En el puerto de Barcelona el rango de valores de difusividad es de $0,1-5\text{m}^2\text{s}^{-1}$, consistente con el nivel de turbulencia ambiente y en general cumple con la Ley de Richardson. Sin embargo, hay experimentos en zonas donde se producen elongamientos y alteraciones locales donde no es aplicable la Ley. Por ello es importante distinguir las zonas de ensayo. En la zona de aguas afuera se detectó que el efecto de la pluma del Llobregat condiciona el flujo, en los canales el efecto venturi y el efecto llenado-vaciado de la marea y en las zonas cercanas a estructuras el efecto de la difracción, reflexión y protección del viento. Estos efectos generan corrientes que actúan produciendo una cizalla que condiciona la difusión. El calado también es un factor importante para niveles de turbulencia alto, junto con la estratificación, puesto que limitan los máximos remolinos que se pueden desarrollar. Sin embargo para valores bajos de turbulencia es independiente.

Se correlacionaron los datos de viento y corriente obteniendo una buena correlación en dirección longitudinal (paralela al canal de navegación), similar a las de otros autores:

$$V_{cx} \text{ (cm/s)} = 2.306 V_{vx} \text{ (m/s)} + 0.148$$

Ec. 9-1

El hecho de que el ajuste tenga un término independiente supone que hay otros agentes forzadores, como pueden ser la marea o la pluma del Llobregat, que pueden desviar la dirección de la corriente respecto del viento significativamente, llegando incluso a oponerse a él, para vientos suaves de hasta 3 m/s. También aquí hay que tener en cuenta los efectos locales mencionados que pueden desviar algunos puntos. Otro aspecto a tener en cuenta es el tiempo que lleva actuando el viento, ya que hay un retardo en su efecto sobre la corriente.

La aplicación del método de series temporales de una línea para la caracterización del oleaje permite obtener parámetros de caracterización del mismo, incluso obtener espectros de energía. La comparativa de los espectros obtenidos con imágenes y un sensor de altura de ola muestra que se identifican las mismas frecuencias pico pero con alguna diferencia de energía, especialmente para las bajas frecuencias, ya que la limitación de la precisión de los sensores (5 cm) para registrar las bajas frecuencias puede subestimar la cantidad de energía en esa región. En la comparativa de los espectros de energía en la zona de costa, de rompientes y de orilla, puede observarse que los picos de energía se producen a las mismas frecuencias con niveles sucesivamente menores por la disipación de energía.

Las corrientes de retorno son difíciles de predecir por su interrelación con el fondo. Aparentemente también son difíciles de detectar, pero con un simple promediado de imágenes se pueden identificar. En los experimentos del Delta del Ebro se detectó una corriente de hasta 70 cm/s, asociada a alteraciones morfológicas, en condiciones de muy baja energía. Las imágenes promediadas pueden indicar las alteraciones del fondo a través de trazadores como la rotura o flotantes.

El modelo numérico LAD desarrollado en el LIM-UPC de tipo lagrangiano 3D basado en la ecuación de convención-difusión reproduce la difusión turbulenta con un algoritmo "random-walk" de partículas y ha dado buenos resultados, especialmente en dirección longitudinal. El modelo se calibró con los espectros de energía y coeficientes de dispersión medidos. En dirección transversal hay que tener en cuenta la inclinación de las imágenes y el oleaje.

Otro modelo de simulación diseñado especialmente para vertidos de hidrocarburo es SPILLSIM. El modelo se basa en una simulación cinemática de la turbulencia (Castilla 2001) con modificaciones específicas para simular el campo de turbulencia en la superficie del océano tanto en el dominio bidimensional de cascada inversa de la energía como en la región a escala más pequeña donde dominan los aspectos de difusión y mezcla por turbulencia tridimensional.

Se analizaron más de 900 imágenes del Radar de Apertura Sintética de los satélites ERS-1 y ERS-2, de tres áreas costeras europeas (Mar Báltico, Mar del Norte y el Mediterráneo NW). La investigación se realizó en el marco de trabajo del proyecto de la Unión Europea CLEAN SEAS. Más información en Platonov et al (2008). Con ellas es posible identificar y cuantificar grandes vertidos de petróleo, analizar su evolución y vejez. Resultó extraordinario el número de vertidos detectados, en el 72,6% de las imágenes analizadas.

En cuanto a la detección de contaminación mediante imágenes satélite se han analizado el número y tamaño de las manchas detectadas. Se cumple la Ley de Zipf, que indica que la frecuencia de la ocurrencia de algunos eventos asociados con las

actividades humanas es mucho mayor a escala pequeña que a gran escala, según una ley de dependencia hiperbólica (en la escala logarítmica – lineal).

El análisis de los vórtices detectados en las imágenes de satélite muestra que existen dos tipos de mecanismos-orientadores de los vórtices: uno dinámico por la influencia de la corriente Liguro-Provenzal y otro batimétrico, por la influencia de los cañones submarinos orientados perpendicularmente a la línea de la costa.

El uso de información de satélite de sensores SAR o de otro tipo puede ser de gran interés para crear una base de datos estacionales de las condiciones dinámicas de la turbulencia a mesoescala en el mar, después de varios años de observaciones se pueden extraer patrones dominantes y entender mejor las causas de las diferentes caracterizaciones topológicas.

En las condiciones simplificadas descritas anteriormente el tamaño máximo de los vórtices estables se puede caracterizar directamente por el Radio de deformación de Rossby RD en función de la raíz cuadrada de la profundidad de la termoclina local h . Hay una escala auto-similar a una muy amplia gama de escalas y una dependencia lineal entre la RD y la frecuencia de Brunt-Väisälä en la condición de un ancho h fijo, que se puede usar para predecir y controlar muchas de las características dinámicas de un área determinada a partir de observaciones por satélite.

La fuerte estratificación vertical de la superficie del agua ayuda al desarrollo de mayores vórtices. La frecuencia de N depende en gran medida del equilibrio térmico estacional, la actividad de las ondas de mezcla y otros procesos como los inducidos por alteraciones locales de la batimetría que afectan a la columna de agua. El alcance y a la distribución espacial de los vórtices es muy útil en el comportamiento predictivo de una zona marina. De tal manera, el análisis de datos más sofisticados, como la evaluación de las escalas de longitud integral o local las dimensiones fractales de la apariencia de la superficie del mar, junto con la información detallada de la posición y el tamaño de los remolinos de mesoescala dominantes del tamaño de alrededor de RD proporciona información útil sobre la turbulencia oceánica de mesoescala.

Es importante caracterizar los tipos y la estructura de los vórtices principales detectados, así como los procesos en cascada espectral que se realizan. Estos pueden ser analizados mediante métodos fractales de análisis de imágenes de la zona, así como con los modelos de la cascada turbulenta y mediciones de campo de difusión.

Los métodos de análisis multifractal se pueden utilizar para discriminar entre los diferentes procesos físicos que, a pesar de ser similares, tienen diferentes mecanismos de transporte para las diferentes escalas, o en el tiempo. Se comparan gráficas multifractales de imágenes SAR de vórtices de celdas de convección que muestran una complejidad máxima para los valores de reflectividad baja, mientras que la convección, probablemente debido a la inestabilidad básica ocurre en todas partes al mismo tiempo, presenta casi la misma la dimensión fractal de una amplia gama de intermedios reflectividad SAR.

La comparación de las medidas fractales de vertidos de crudo recientes y vertidos más desarrollados o viejos es interesante. Inicialmente la dimensión fractal es baja pero cuanto más tiempo lleva el vertido en un entorno turbulento aumenta hasta 1,5-1,6.

9.2 TRABAJO FUTURO:

El tratamiento digital de imágenes se ha mostrado como una técnica muy útil en muchos campos de investigación. Cada vez las tecnologías permiten obtener imágenes de mayor resolución, con instrumental más sencillo y sistemas de tratamiento más rápidos y on-line, de manera que todas estas técnicas se pueden sistematizar para obtener resultados casi a tiempo real.

Sería interesante realizar un mayor número de experimentos en puertos para poder caracterizar mejor el efecto de la cizalla producido por la reflexión y difracción de los muelles o el efecto venturi de los canales, la estratificación, marea, etc.

Con la nueva configuración del puerto de Barcelona se podrían analizar los cambios de flujos con la nueva bocana y a desviación del río.

Convendría realizar un estudio de la vorticidad generada en los puertos, tanto la generada por los cambios de alineación de los muelles, como los generados por las turbinas de los barcos, analizar su capacidad de movilización de sedimentos e incluso la extracción de bloques de hormigón de varias toneladas. Esta patología es un caso común en muelles de más de 20 años.



Figura 9.1. Cajones de hormigón movidos en el puerto de Vilanova.

La simulación numérica permite deducir el punto y hora de vertido teniendo en cuenta las condiciones ambientales y mediante el control del tráfico marítimo se puede saber los buques que pasaron por la zona, de manera que se puede identificar el origen de un vertido. El hecho de no escapar al ojo del satélite ya es un mecanismo disuasorio pero cuanto más precisa sea la predicción más fácil será su control, por lo que es preciso incrementar esta precisión.

En la correlación entre el viento y la corriente se producen algunas desviaciones debidas a que el viento no está desarrollado. Se podría analizar este desfase entre el viento y la corriente, o dicho de otro modo, cuanto tiempo necesita el viento para

transferirle energía a la corriente, y si este tiempo de desfase está relacionado con los niveles de turbulencia existente.

Debido a diferentes factores ambientales, como, la actividad sísmica regional, las complejas interacciones entre los vórtices y los bordes del cañón submarino, condicionando las tormentas y las acumulaciones de grandes cantidades de sedimentos en los cañones submarinos se pueden provocar fugas de productos líquidos petroquímicos en la columna de agua. Este origen natural no biológico sustancias orgánicas disueltas hasta la superficie marina puede producir manchas características de hidrocarburo en la superficie. El origen de esas filtraciones naturales pueden estar asociados con los sedimentos fangosos de carácter orgánico o con el gas líquido y los depósitos de petróleo submarino. Si esta hipótesis es correcta, se podría explicar por qué las imágenes SAR detecta múltiples características de película orgánica en la superficie del mar durante la temporada de invierno y en las áreas marinas de distancia de las costas.

Recientemente, el nuevo diseño de los recursos petroleros en alta mar los métodos de detección han avanzado y con ERS-2/RADARSAT/ENVISAT SAR / ASAR imágenes pueden ser una solución para la localización de las reservas de petróleo ricos en el fondo del mar debido a la alta incidencia de la detección de la superficie de locales el aceite se filtra a los rastros de origen no biológico.

En el caso en que estemos suficientemente alejados de la costa se puede usar el análisis dimensional teniendo en cuenta la rotación para definir un coeficiente de difusión que está basado en las anomalías de superficie del nivel del mar generadas por la rotación y son fácilmente detectables desde satélite. La evolución temporal estaría controlada por la energía cinética de los remolinos turbulentos promediados sobre una zona sin grandes variaciones de latitud (Shuckburgh et al 2009). Se puede calcular a partir del parámetro de coriolis f como

$$K = K(f, h') = \alpha \frac{g}{|f|} \sqrt{\langle h'^2 \rangle} \quad \text{Ec. 9-1}$$

La validación de esta teoría es fácilmente evaluable con imágenes SAR y realizar mapas de difusividad similares a los de la figura 8.28.

Sería conveniente para los distintos tipos de foramiento, medir simultáneamente las imágenes y medidas eulerianas o lagrangianas de boyas y así se podría tener la función de estructura y aplicar la Ley de Richardson Generalizada incluyendo la intermitencia y la dimensión fractal.

10 BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- Aagaard T y Holm J. (1989) "Digitalization of Wave Run-Up Using Video Records." *Journal of Coastal Research*, vol 5, nº3, 547-551.
- Aarninkhof SGJ. (2003) "Nearshore bathymetry derived from video imagery." PhD Thesis Delft University of Technology. 175pp.
- Albarges J. (1980) "The fate and source identification of petroleum tras in the marine environment." *Colloques Internationaux du CNRS nº 293* pp.233-247.
- Allen SE. (1988) "Rossby adjustment over a slope." Ph D thesis, Univ. of Cambridge. England. 206 pp.
- Apel JR. (1995) "Principles of ocean physics." Ed. Academic Press Limited. 4 ed. V.38. *International Geophysics Series* Edited by Renata Dmowska and James R. Holton, pp 634.
- Archetti R. (2008) "Monitoraggio e previsione della evoluzione di una spiaggia protetta da opere a cresta bassa." *Proc. Of XXXI Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche — IDRA*.
- Arnau PA. (2000) "Aspectos de variabilidad a mesoescala de la circulación marina en la plataforma continental catalana." *Tesina de especialidad. UPC*. Pp 600.
- Artale V, Boffetta G, Celani A, Cencini M y Vulpiani A. (1997) "Dispersion of passive tracers in closed basins: Beyond the diffusion coefficient." *Phys. Fluids*, 9 3162.
- Arthur R. (1962) "Rip current and their causes." *Journal of Geophysical Research*, American Geophysical Union, 67, 7, 2777-2779.
- Bahia ET. (1997) "Estudio teórico-experimental de la dispersión de contaminantes en regiones costeras." *Tesis Doctoral, ETSECCPB, Universitat Politecnica de Catalunya –UPC, Barcelona*.
- Baldock T y Hugues M. (2006) "Field observations of instantaneous water slopes and horizontal pressure gradients in the swash-zone." *Continental Shelf Research* 26, pp 574–588.
- Batchelor GK. (1967) "The Theory of homogeneous turbulence." *Cambridge monographs on mechanics and applied mathematics*. Ed. Cambridge University Press. XI, 197 pp.
- Batchelor GK. (1988) "An Introduction to fluid dynamics." Ed. Cambridge University Press. XVIII, 615 p.
- Battjes J. (1975) "Modeling of turbulence in the surf zone." *Annual Rev. Fluid Mech.* 20, 257-293.
- Battjes JA y Jansen JPFM. (1978). "Energy loss and set-up due to breaking in random waves." *Proc. of 16th Int. Conf. on Coastal Eng., Hamburg, ASCE*, pp. 569-587.
- Benetazzo A. (2006) "Measurement of water surface wave fields using a nonintrusive method based on a stereo-matching algorithm." *PhD Diss., University of Padua*.
- Bezerra MO. (2000) "Diffusion de contaminantes en la costa." *PhD Thesis, UPC*.
- Bezerra MO, Díez M, Medeiros C, Rodríguez A, Bahia E, Sánchez-Arcilla A y Redondo JM. (1998) "Study on the influence of waves on coastal diffusion using image analysis." *Applied Scientific Research* 59: pp 191-204.
- Bezerra MO, Castilla R, Sánchez MA y Redondo JM. (1995) "Turbulent diffusion in enclosed beaches." *Medcoast '95*, Ed. E. Ozhan y Ankara. Pp. 1189-1198.

- Bezerra MO y Redondo JM. (1999) "Vertical variation of horizontal eddy diffusivity, the role of waves, wind and tidal currents." Workshop on Advances in Turbulence V, Girona, Spain, 8-9 June, 1999.
- Bezerra MO, Akel AR, Araujo TRC, Krelling APM, Redondo JM (2009) "Application of aerial video images for Lagrangian tracer studies in maritime and estuarine port zones." Journal of Coastal Research SI 56. Proc. Of 10th international Coastal Symposium. Pp 787-791 Lisbon Portugal. ISSN 0749-0258
- Bishop G y Donelan M. (1987) "Measuring waves with pressure transducers." Coastal Engineering, 11, 309-328
- Boesch D. (1974). "Oil Spills and the marine photogramme." Ballinger Publisher Company Cambridge, Mass
- Bouguet JY. (2004 a) "Camera Calibration Toolbox for Matlab" <http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calibdoc/>
- Bouguet JY. (2004 b) "Diffusion of sewage effluent in an ocean current." Proc. Frist Int. Conf. on Waste Disposal in the Marine Environment, Pergamon Press, New York, pp. 246-267.
- Boussinesq J (1877) "Theorie de l'ecoulement tourbillant." Mem. Pres. Acad. Sci. Paris, vol 23, 46
- Borthwick y Joynes (1989). "Horizontal dispersion of oil pollutant in coastal waters." Proc. Int. Conf. in Hydrodynamic and Enviromental Model in Coastal, Estuarine and River Waters. U.K. University of Bradford. Pp 322-331.
- Bradshaw P. (1979) "An introduction to Turbulence and its Measurement." Ed. Pergamon Press.
- Brooks NH. (1960) "Diffusion of sewage effluents in an ocean current." Proc. of First International Conference on Waste Disposal in the Marine Environment.
- Bueno J, Aleixandre J, Tamarit J, Moreno L, Prada JM, Hernández A (1997) "Sistema óptico de medida de batimetrías del CEPYC." Ingeniería Civil, núm 106
- Candela J. (1997) "Proceedings of Course on Shallow Water and Shelf Sea Dynamics summer schools Physics, Trieste, Italy." Eds. United Nations Educational Scientific and Cultural Organization, International Atomic Energy Agency,
- Carlson CT. (1985) "Field studies of run-up on dissipative beaches." Proceedings 19th Coastal Engineering Conferences (ASCE), 399-414.
- Castilla R. (2001) "Simulacion cinematica de flujo turbulento. Aplicación al estudio de la estructura de la turbulencia y la difusión turbulenta." PhD Thesis UPC, Barcelona
- Castilla R, Redondo JM, Gamez-Monterol PJ y Babiano A. (2007) "Nonlinear Processes Geophysics."
- Chassaing P. (2000) "Turbulence en mécanique des fluides." Cépaduès éditions, 2000. XXXIV+626 pp.
- Chapman H, Purnell K, Law R y Kirby M. (2007) "The use of chemical dispersants to combat oil spills at sea: A review of practice and research needs in Europe" Marine Pollution Bulletin Volume 54, Issue 7, 827-838.
- Chen X y Allen SE. (1996) "The influence of canyon on shelf currents: A theoretical study." Journal of Geophysical Research, Vol. 101, NO C8, pp. 18.043-18.059.
- Cohen A. (2007) "Assessment of intertidal morphological changes using video monitoring" Coastal Practice Network. Delft Hydraulics.

- Damiani L y Molfetta M. (2008) "A video based technique for shoreline monitoring in Alimini (LE)" Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection Coastlab08, Bari.
- Dankert H, Horstmann J, Lehner S, Rosenthal WG. (2003) "Detection of wave groups in SAR images and radar image sequences." IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 41, 1437–1446.
- Diez M. (1998) "Estudio de la Hidrodinámica de la zona de rompientes mediante el tratamiento digital de imágenes.." Tesina de Especialidad Ingeniería de CCP, UPC, Barcelona.
- Diez M, Mosso C, Sierra JP, Mestres M, Sanchez-Arcilla A, Rodrigues A, Bezerra MO y Redondo JM. (1998) "Estimation of dispersion coefficients in low wave energy surf zone using video images." Fourth International Conference, Littoral'98, European Coastal Association for Science and Technology, Barcelona, Spain, 14-17 september, 535 – 542 pp.
- Diez M, Redondo JM, Mestres M, Platonov A y Sánchez-Arcilla A (1999) "Control de contaminantes mediante imágenes" Proc. V Jornadas de Puertos y Costas. A Coruña.
- Diez M, Sierra JP, Redondo JM, Mosso C, Bezerra MO. (1999) "Estudio hidrodinámico de la zona costera mediante el análisis digital de imágenes." Ingeniería del Agua, vol.6, nº3, 283-292 pp.
- Diez M, Bezerra MO, Sierra JP y Redondo JM (1999) "Turbulent mixing in the breaking zone." Proceedings Advances in Turbulence,
- Diez M, Bezerra MO y Redondo JM (2000) "Turbulent diffusion in the environment." XDFTG – Xarxa Temàtica de Dinàmica de Fluids i Turbulència Geofísica, 2000, p. 69-75.
- Díez M, Redondo JM, Vila J. (2001) "Estudio de corrientes y dispersión en el puerto de Barcelona." Proc. VI Jornadas de Puertos y Costas. Palma de Mallorca.
- Diez M, Bezerra MO y Redondo JM (2005) "Flow patterns and turbulent dispersion coefficients near harbours using video images."
- Diez M, Bezerra MO Medeiros C y Redondo JM. (2006) "Experimental Measurements and Diffusion in Harbour Zones." Lectures in environmental turbulence, Babiano A., Fraunie P., Redondo JM y Vassilicos JC. Ed. CIMNE, Barcelona.
- Diez M, Bezerra MO, Mosso C, Castilla R y Redondo JM. (2009) "Experimental measurements and diffusion in harbour and coastal zones." Il Nuovo Cimento della Società Italiana di Fisica C. Vol. 31 C, N. 5-6, 843-859
- Einstein, A. (1905), "Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen.", Annalen der Physik 17: 549–560.
- Erikson LiH, Hanson H. (2005) "A method to extract wave tank data using video imagery and its comparison to conventional data collection technique." Computers & Geosciences 31, 371–384.
- Faber T. (1995) "Fluid Dynamics for Physicist." Cambridge University Press.
- Fernández Varela R. et al. (2007) "Identificación y análisis del envejecimiento de vertidos de hidrocarburos en el ecosistema marino" Universidad de La Coruña
- Figueras A y Anxo M. (2004) "Resultados del ensayo de PUTIDOIL en el tratamiento de un vertido controlado de gas-oil en el puerto de Vilanova i la Geltaú" CSIC Vigo

- Flores H, Andreatta A, Llona G y Saavedra I. (1998) "Measurements of oil spill spreading in a wave tank using digital image processing" In: Proceedings of the First International Conference on Oil and Hydrocarbon Spills, Modelling, Analysis and Control, Oil Spill, pp. 165–173.
- Frisch U. (1995) "Turbulence." Cambridge University Press. pp 296.
- Fung J y Vassilicos JC. (1998) "Efectos de las variaciones en la ley espectral." Phys. Rev. E , 52 1677.
- Gabaldon J. (2000) "The effect of small-scale turbulence on the phytoplankton dynamics in the open ocean. Monitoring and numerical simulation in the vertical dimension." Tesis Doctoral, Dept de Física Aplicada, ETSECCPB, Universitat Politècnica de Catalunya –UPC, Barcelona.
- Gade M y Redondo JM. (1999) "Marine pollution in European coastal waters monitored by the ERS-2 SAR: A comprehensive statistical analysis." IGARSS 99, Hamburg, vol. III, p. 308-312.
- Gade M, Hühnerfuss H y Korenowski GM. (2006) "On the imaging of biogenic and anthropogenic surface films on the sea by radar sensors", in Marine Surface Films: Chemical Characteristics, Influence on Air-Sea Interactions, and Remote Sensing, Eds, Springer, Heidelberg, 342 pp., 189-204.
- García J, Herranz D, Negro V, Varela O, Flores J. (2003) "Tratamiento por color y video." VII Jornadas Españolas de Costas y Puertos.
- Garrat JR. (1992) "The atmospheric boundary layer." Cambridge University Press pp 316.
- Gerani A, La Rosa G y Patania F. (2001) "The use of thermal infrared imagery for the control of pollutions in Mediterranean Sea." Proc of Int Symposium of the Mediterranean Sea. Chipre IAWQ. Pp. 69-78.
- Giacomazzi E, Bruno C. y B. Favini (1999) "Fractal modelling of turbulent mixing". Combustion Theory Modelling 3, 637-655. IOP.
- Goldstein SE. (1951) "On diffusion by discontinuous movements and on the telegraph equations." Quart. J. Mech. 4, Part 2, pp. 129-156.
- Grau J. (2005) "Processat digital d'imatges aplicat a l'anàlisi de seqüències Meteosat." Ph.D. Thesis, UPC.
- Guillén J, García-Olivares A, Ojeda E, Chic O, Osorio A y González R. (2008). "Longterm quantification of beach users using video monitoring." Journal of Coastal Research, 24 (6), doi: 10.2112/07-0886.1).
- Gunnerson CG (1959 a) "Sewage disposal in Santa Monica Bay." Trans. Amer. Soc. Civ. Engrs. 124, 823-842.
- Gunnerson CG (1959 b) "Discussion of eddy diffusion in homogeneous turbulence." Proc. Amer. Soc. Civ. Engrs. 85, HY4, April pp. 101-109.
- Harris G. P. y Lott J. N. A. (1973) Observations of Langmuir circulations in lake Ontario. Limnology and Oceanography
- Harris T, Jordaan J, McMurray W, Verwey C y Anderson F. (1963) "Mixing in the surf zone." International. Jour. Water Pollution, Vol. 7, 649-667.
- Harris WD y Umbach MJ (1972) "Underwater mapping." Photo. Eng. Sensing, 38, 765-772.

- Hequan S, Dahong Q, Yongming S, Yongxue W, (2004) "Wave measurement based on light refraction." *Acta Oceanologica Sinica* 23 (2), 359–366.
- Hernández D, Varea C y Barrio R. (2006) "Wave front dynamics with directional anomalous diffusion." *Phys. Rev. E*, vol. 74, 046116.
- Hernández D, Barrio R y Varea C. (2009) "Reaction diffusion dynamics in a subdiffusive regime." *Phys. Rev.E*, vol. 79, 026109.
- Hesselink L. (1988) "Digital Image processing in flow visualization." *Annual Rev. Fluid Mech.*, 20, 421-485.
- Hilsenstein V. (2005) "Surface Reconstruction of WaterWaves using Thermographic Stereo Imaging." *Proceedings of the Image and Vision Computing New Zealand (IVCNZ 2005)*, Dunedin, New Zealand, pp. 102–107
- Hinze J. (1975) "Turbulence." McGraw Hill Book Co., New York, USA, 2 ed.. 790 pp.
- Holland K, Holman R y Sallenger A. (1991) "Estimation of overwash bore velocities using video techniques." *Coastal Sediments ASCE*, pp. 489-497.
- Holland K, Raubenheimer B, Guza R y Holman R. (1995) "Run-up kinematics on a natural beach" *J. Geophys. Res.*, 100(C3), 4985-4993.
- Holman RA y Sallenger A. (1985) "Setup and Swash on a Natural Beach" *Journal of Geophysical Research* Vol.90, No. C1, 945-953.
- Holman R y Lippmann T. (1987) "Remote sensing of nearshore bar systems making morphology visible." *Coastal sediments, ASCE*, pp. 929-944.
- Holman RA y Sallenger AH (1992) "The Argus program: application of video remote sensing to the study of nearshore processes." *ICCE – Venice*, pp. 417-418.
- Holman RA y Stanley J. (2007) "The history and technical capabilities of Argus." *Coastal Engineering*, 54 (6–7), 477–491.
- Horikawa K (1988) "Nearshore dynamics and coastal processes." University of Tokyo Press, Tokyo.
- Horikawa K, Lin MC, Sasaki TO. (1978) "Mixing of heated water discharged in the surf zone." *Proc. Int. Conf. on Coastal Engineering, ASCE*, 2563-2583.
- Hotta S y Mizuguchi M. (1980) "A field study of waves in the surf zone." *Coastal Engineering in Japan*, vol. 24, 41-76.
- Hull P y Müller G. (2002) "An investigation of breaker height, shape and pressure." *Ocean Engineering* 22, 59-79.
- Ibañez O, Rabuñal J, Castro A, Dorado J, Iglesias G y Pazos, (2007) "A frame work forme a surging waves level in a wave tank with artificial vision techniques." *WSEAS Transactions on Signal Processing* 3 (1), 17–24.
- Iglesias G, Ibañez O, Castro A, Rabuñal y J.R, Dorado J. (2009) "Computer vision applied to wave flume measurements." *Ocean Engineering* 36, 1073–1079.
- Inman DL, Tait RJ y Nordstrom CE (1971) "Mixing in the surf zone." *Journal of Geophysical Research*, Vol 76, nº 15, 3493 – 3514.
- Jensen A. Pedersen GK y Wood DJ (2003) "An experimental study of wave run-up at a steep beach." *J. Fluid Mech.* (2003), vol. 486, pp. 161–188.
- Jimenez JA, Osorio A, Marino-Tapia I, Davidson M, Medina R, Kroon A, Archetti R, Ciavola P y Aarnikhof S. (2007) "Beach Recreation Planning Using Video-derived Coastal State Indicators." *Coastal Engineering*, 54, 507–521.

- Jolly, G. W., A. Mangin, F. Cauneau, M. Calatuyud, V. Barale, H. M. Snaith, O. Rud, M. Ishii, M. Gade, J. M. Redondo and A. Platonov. (2000). The Clean Seas Project (ENV4-CT96-0334) Final Report <http://www.satobsys.co.uk/CSeas/report.html> DG XII/D of the European Commission under contract N° ENV4-CT96-0334. Bruselas, pp. 1 -75.
- Joseph J y Sender H (1958) "Über die horizontale diffusion in meere." Dtsch. Hydrogr. Z. II, 29 pp.
- Knaapen MAF. (1997) "Filtering of Bathymetry estimations gained by video imaging of breaking waves." Master Thesis Delft University of Technology.
- Kolmogorov AN (1941) "Local turbulent structure in incompressible fluids at very high Reynolds number." Doklady Ak. Nauk SSSR 30, 299-303.
- Kolmogorov AN (1962) "Mecanique de la turbulence." Coll. Intern. Du CNRS à Marseille, Paris, CNRS, pp. 447-458
- Kraus N, Isobe M, Igarashi H, Sasaki T y Horikawa K. (1982) "Field experiments on longshore sand transport in the surf zone." Coastal Engineering, ASCE, 969-988.
- Kroon A, Davidson MA, Aarninkhof SGJ, Archetti R, Armaroli C, Gonzales M, Medri S, Osorio A, Aagaard T, Holman RA y Spanhoff R (2007) "Application of remote sensing video systems to coastline management problems." Coastal Engineering, 54, 493-505.
- Kuriyama Y y Ozaki Y. (1993) "Longshore current distribution of a bar-trough beach-Field measurements at HORF and numerical model." Report Port and Harbour Research Institute, Vol. 32, n° 3, 3-37.
- Landau LD y Lifshitz EM (1997) "Fluid Mechanics." Course of theoretical physics, v.6, Ed. Butterworth – Heinemann, 2 Ed.
- Lee JH y Veronis G. (1989) "Determining velocities and mixing coefficients from tracers." Journal of Phys. Ocean., American Meteorological Society, Vol. 19, April, 487-500
- Lee-Lueng F, Dudley C, Le Traon P, Rosemary M (2010) "Eddy Dynamics from Satellite Altimetry" Oceanography Society, Vol. 23 , N. 4 , P. 14-25. <http://archimer.ifremer.fr/doc/00026/13744/10874.pdf>
- Lesieur M. (1997) "Turbulence in fluids." Kluwer Academic Publishers, 3 Ed.
- Lichtenegger J. (1993) "ERS-1 SAR images for oil spill surveillance (Northwest spanish coast, La Coruña)." Oil Watch Eurimage. Via E. D'Onofrio, 212.00155 Roma.
- Lippmann TC y Holman RA. (1989) "Quantification of sand bar morphology: A video technique based on wave dissipation." Journal of Geophysical Research.,94 (C1), 995-1011.
- Lippmann TC y Holman RA. (1991) "Phase speed and angle of breaking waves measured with video techniques." Coastal Sediments, ASCE, pp. 542-556.
- Lippmann TC y Holman RA. (1992) "Wave group modulations in cross-shore braking patterns." ICCE, ASCE, 918-931.
- Lippmann TC, Holman R y Hathaway K. (1993) "Episodic, non stationary behavior of a double bar system at Duck, N.C., USA, 1986-1991." Journal of Coastal Research, SI,15, pp. 49-75.
- Lippmann TC y Thorton EB. (1994) "The spatial distribution of wave rollers and turbulent kinetic energy on a barred beaches." Proc. Coastal Dynamics'94.

- Longuet-Higgins MS y Turner JS. (1974) "An entraining plume model of a spilling breacher." *Journal of Fluid Mechanics*, 63(1): 1-20.
- Luger SA Monteiro PMS y Van Ballegooyen R. (1999) "Predicting changes to hydrodynamics, water quality, Sediment transport and wave resonance characteristics in Saldanha Bay resulting from alternative Port expansion layouts." CSIR, Environmentek, P O Box 320, Stellenbosch, 7599.
- Mahjoub B.O., Babiano A. y Redondo J.M. (1998) . *Applied Scientific Research*. 59 , 299-313.
- Mahjoub, B. O. (2000) Intermittency and non-local dynamics PhD Thesis UPC. Barcelona
- Mahjoub O.B., Redondo J.M. y Babiano A. (2000) Self similarity and intermittency in a turbulent non-homogeneous wake. *Proceedings of the Eighth European Turbulence Conference*. (Eds. Dopazo et al.) CIMNE, Barcelona. 2000. p.783-786.
- Maresca J y Seibel E. (1976) "Terrestrial photogrammetric measurements of breaking waves and longshore currents in the nearshore zone." *Proc. I.C.C.E., ASCE*, pp. 681-700.
- Marrasé C, Saiz E y Redondo JM. (1997) "Lectures on plankton and turbulence." *Sci. Mar.*, 61 (Supl.1).
- Martínez M, Cotos M, Arias J y Tobar A (1998) "Cálculo de Corrientes superficiales marinas a partir de imágenes térmicas NOAA y estimación de la influencia de los vientos en su aparición: aplicación al suroeste de la Península Ibérica." *Revista de Teledetección num 9*.
- Martínez Benjamin JJ. (1995) "Satellite microwave sensing for oceanographic studies." *Mixing in Geophysical Flows*. JM Redondo y O Metais (Eds.). CIMNE, Barcelona.
- Masch FD. (1963) "Mixing and Dispersion of Wastes by Wind and Wave Action." *International Journal of Air Water Poll.*, vol. 7, pp 697-720.
- Mash FD (1961) "Mixing and dispersive action of wind waves." *Inst. Engr. Res. Tech. Rep.*, Series 138, Issue 6, Uni. of California, Berkeley, 106 pp.
- Mash FD. (1963) "Mixing and dispersion of wastes by wind and wave action." *Int. J. Air. Wat. Polt.* Pergamon Press, vol.7, 697-720.
- Matulka A (2009) "Turbulent Structure in Environmental Flows: Effects of Stratification and Rotation." PhD Tesis. Ingeniería Ambiental. UPC
- Medeiros C, Bezerra MO y Redondo JM. (1996) "Turbulent dispersion in confined beaches." 39th Brazilian Geology Congress, 455-493.
- Medina R, Marino-Tapia I, Osorio A, Davidson M y Martin FL. (2007) "Management of dynamic navigational channels using video techniques." *Coastal Engineering*, 54, 523–537.
- Meneveau C y Sreenivasan KR (1991) "The multifractal nature of turbulent energy dissipation." *J. Fluid Mech*, 224, 429–484.
- Mestres M, Díez M, Sierra JP, Rodriguez A y Sánchez-Arcilla A (1998) Modelling the dispersion of dye spots in coastal waters. *Proc 4th Int Conf Littoral*.
- Michelson I. (1954) "Discussion and extension of Goldstein mathematical model representing diffusion with hyperbolic partial differential equations." *Amer. Inst. Aerolog. Res.*, Report under Contract AFI 8(600)-746.

- Monin AS. (1970 a) "Main features of turbulence in the sea." *Oceanology* 10, 184-189.
- Monin AS. (1970 b) "On turbulent flow in the ocean." *Doklady Ak. Nauk SSSR* 193, 1038-1040.
- Monin AS y Ozmidov RV. (1985) "Turbulence in the ocean." *Environmental Fluid Mechanics*, Kluwer Ac Publisher, Dordrecht. pp 247. Trad. H. Tennekes, Editor GTCsanady.
- Moore SF y Dwyer RL (1974) "Effects of oil on marine organisms: A critical assessment" of published data *Water Research* Vol 8, Issue 10, 819-827.
- Mösso C, Sierra JP, Díez M, Sanchez-Arcilla A, Rodriguez A, Santás JC y Ruiz V (1998) "Experimental study of wave deformation in the near-shore zone. Delta'96 case." *Proc 4th Int Conf Littoral*, pp 323-332.
- Mösso C (2003) "Estudio numérico-experimental de la dinámica de la zona cercana a la costa." Tesis doctoral. UPC <http://www.tdx.cat/TDX-1213104-13494>.
- Mösso C, Sierra JP, Rodriguez A, Gracia V y Barnadas J. (2007) "Estudio experimental de la evolución del espectro del oleaje en una playa." *Revista Ingeniería Hidráulica en Mexico*, Volumen XXII, nº1, pp 47-61.
- Neff JM y Anderson JW. (1981) "Response of Marine Animals to Petroleum and Specific Petroleum Hydrocarbons" *Applied Science Publishers Ltd.*, London England. 177 p.
- Neff JM. (2002) "Bioaccumulation in marine organisms: effect of contaminants from oil well produced water." Elsevier Ed.
- Obukhov AM. (1949). Structure of the temperature field in a turbulent flow. *Izv.Akad. Nauk SSSR Ser. Geogr. Geojiz.* 1 3: 58-69.
- Obukhov AM. (1962). "Some specific features of atmospheric turbulence." *J. Geophys. Res.* 67, 311,14.
- Okubo A y Ozmidov RV. (1970) "Empirical dependence of the coefficient of horizontal turbulent diffusion in the ocean on the scale of the phenomenon in question." *Oceanology* 6, 308-309.
- Okubo A. (1971) "Oceanic diffusion diagrams." *Deep-Sea Res.*, 18, 789-802.
- Ortiz C. (2008) "Estudio morfodinámico de las playas de La Magdalena (Cantabria) a partir de técnicas basadas en video." MSc Thesis. Universidad Nacional de Colombia.
- Osorio A. (2005) "Desarrollo de técnicas y metodologías basada en sistemas de vídeo para la gestión de la costa." Phd Thesis. Universidad de Cantabria.
- Osorio A. (2006) "Desarrollo de cámaras de video para hacer seguimiento de las actividades de dragado en los canales de navegación". Premio Modesto Viguera, 2006. Concedido por la ATPYC.
- Osorio, A., Pérez, J. Ortiz, C., Medina, R. (2007). Técnicas basadas en imágenes de vídeo para cuantificar variables ambientales en zonas costeras, *Avances en Recursos Hidráulicos*, Numero 16, p. 51-64.
- Ozmidov RV. (1990) "Diffusion of contaminants in the ocean." *Oceanographic Sciences Library – vol.4*, Kluwer Academic Publishers, Londres. pp 283.
- Pérez Silva RM, Abad G, Abalos A, Marañón A, Bermúdez R. (2003) "Biodegradación de naftaleno por pseudomonas Aeruginosa at18." *Tecnología química* Vol. XXIII, No. 3, pp 21-27.

- Pérez Marrero J, Cardona L, Amat García JM, Marcos V, Llinás O (2009). "Predicción operacional de las trayectorias de objetos a la deriva en alta mar." I Jornadas Nacionales De Seguridad Y Contaminación Marina
- Platonov A. (2001) "Análisis de la contaminación marina y estudio de la vorticidad." VII Jornadas de Puertos y Costas.
- Platonov A. (2002) "Aplicación de imágenes de satélite SAR en los estudios de contaminación marina y de dinámica de las aguas en el Mediterráneo Noroccidental." PhD Thesis. Dep Física Aplicada. UPC Barcelona.
- Platonov A, Carrillo A, Matulka A, Sekula E, Grau J, Redondo JM y Tarquis A (2008) "Análisis multifractal de procesos autosimilares: imágenes satélite e inestabilidades baroclínicas." Revista Internacional de Metodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, 24, (1), 25-48.
- Platonov, A. [et al.]. Multifractal observations of eddies, oil spills and natural slicks in the ocean surface. "Nuovo cimento della Società Italiana di Fisica C. Geophysics and space physics", 11 Juny 2009, vol. 31, núm. 5-6, p. 861-880.
- Prandtl L. (1925) "Modern Developments in Fluid Dynamics." Naturwissenschaften, 13, 93.
- Pritchard DW. (1956) "The dynamic of a coastal plain stuary" Journal of Marine Research. 15, 33-42.
- Redondo JM. (1990) "The structure of density interfaces." Phd Thesis, Univ. Cambridge.
- Redondo JM, Rodriguez A, Bahia E, Falqués A, Gracia V, Sánchez Arcilla A y Stive MJF. (1994) "Image Analysis of Surf-Zone Hydrodynamics." Coastal Dynamics'94, ASCE.
- Redondo JM. (1995) "Turbulent mixing in the atmosphere and ocean. Fluid Physics." Proceedings os Summer Schools. Eds. M.G. Velarde and C.I.Christov. World Scientific, 584-597.
- Redondo JM. (1996) "Turbulencia y mezcla en dinamica de fluidos geofisicos." ETSECCPB, Universitat Politecnica de Catalunya (UPC), pp 380.
- Redondo JM, Sanchez MA y Castilla R. (2000) "Vortical structures in stratified turbulent flows, in Turbulent Diffusion in the Environment." Redondo J. M.and Babiano A. Ed FRAGMA, Madrid. pp. 113-120.
- Redondo JM, Grau J, Platonov A and Garzon G (2008) "Análisis multifractal de procesos autosimilares: imágenes de satélite e inestabilidades baroclinas." Rev. Int. Mét. Num. Cál. Dis. Ing. 24(1), 25-48.
- Redondo JM, Díez M y Bezerra MO (2009) "Synthetic Turbulence" ERCOFTAC Series
- Redondo JM, Platonov A.K. (2009) "Self-similar distribution of oil spills in European coastal waters." Environmental Research Letters, vol. 4, 014008, 10 pp.
- Redondo JM, Platonov A, Matulka A, Tarquis A, Castilla R, Fraunie P, Sekula E y Díez M (2011) "Fractal measurements of ocean diffusivity" Trabajo presentado en el Instituto Pluridisciplinar de la Universidad Complutenses de Madrid http://www.ucm.es/info/fluidos/madrid/redondo_fractal_measurement_diffusion_diaz_matulka.pdf
- Reynolds O (1883) "An Experimental investigation of the circumstances which determine the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of

- resistance in parallel channels". *Philosophical Transactions of the Royal Society* 174, 935-982.
- Richardson LF (1922) "Weather prediction by numerical process." Cambridge University Press.
- Richardson LF (1926) Atmospheric diffusion shown on a distance-neighbour graph *Proc. R. Soc. A* 110 709
- Richardson LF y Stommel H. (1948) "Note on eddy diffusion in the sea." *J. Meteorol.* 5, 238-240.
- Rodríguez A, Sánchez-Arcilla A, Redondo JM, Bahía E y Sierra JP. (1995) "Measurements and modelling of pollutant dispersion in the nearshore region." *Water Science and Technology*, IAWQ, 32, 10-19.
- Rodríguez A (1997) "Estudio Experimental de la Hidrodinámica de Zona de Rompientes." PhD Thesis. Laboratori d'Enginyeria Marítima, ETSECCP, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Rodríguez A, Bahía E, Díez M, S-Arcilla A, Redondo JM y Mestres M. (1997 a) "Estudio Experimental de Procesos de Mezcla en Aguas Costeras." *Proc. IV Jornadas españolas de Ingeniería de Costas y Puertos*. Ed. J.C.Serra, pp. 643-656.
- Rodríguez A, Sánchez-Arcilla A, Bahía E, Redondo JM y Díez M. (1997 b) "Study of Surf-Zone Mixing Using Video Images. International" Conference on Coastal Engineering. ASCE.
- Rodríguez A, Sanchez-Arcilla A, Movellan E, Mosso C, Díez M, Sospedra J, Cruzado A, Velasquez Z, Naudin JJ, Oriol L y Cauwet G. (1997 c) "Experimental study of saline intrusion and river plume in the microtidal estuary of the Ebro-I" Plenary workshop FANS project. May, 1997, Blanes.
- Salmon SA, Bryan KR y Coco G (2007) "The use of video systems to measure run-up on beaches." *Journal of Coastal Research*, Special Issue No 50, pp 211-215.
- S.Arcilla A, Rodríguez A, Bahía E, Redondo JM y Díez M. (1997 a) "Study of surf-zone mixing using video images." *International Conference Coastal Dynamics*, ASCE. RU.
- Sánchez-Arcilla A, Rodríguez A, Santás JC, Mösso C, Gracia V, Sospedra J, K'osyan R y Kuznetsov S. (1997 b) "Experimentos Hidro-morfodinámicos en la zona costera del Delta del Ebro." *IV Jornadas Españolas de Ingeniería de Puertos y Costas*, Cádiz.
- Sasaki T, Horikawa K y Hotta S. (1976) "Nearshore Current on a Gently Sloping Beach." *Proc. International Conference on Coastal Engineering*. ASCE, 36, 626-644.
- Sekula E y Redondo JM (2009) "The structure of turbulent jets, vortices and boundary layer: Laboratory and field observations." *Il nuovo cimento* Vol. 31 5-6 DOI 10.1393/ncc/i2009-10358
- Shuckburgh E, Jones H, Marshall J y Hill C. (2009) "Robustness of an effective diffusivity diagnostic in oceanic flows". *Journal of physical oceanography*. Vol 39.
- Sierra JP, Mösso C, Sánchez-Arcilla A, Rodríguez, A Redondo JM y Díez M (1998) *Caracterización del sistema de corrientes en la zona de surf mediante analisis de velocidades e imagenes de vídeo. Caso Delta'96*. Bangor

- Solanas, A (2002) "Biodegradación microbiana en la contaminación por hidrocarburos." *Mundo Científico*. Vol. 1 N° 8. Pp 913-920.
- Sonu C. (1969) "Tethered balloon for study of coastal dynamics." *American Society. Photogrametry., Tech.Rep.*, 66, 91-103.
- Sonu C. (1973) "Three-dimensional beach changes." *J.Geology*, 81, 42-64.
- Stommel, H (1949) "Horizontal diffusion due to oceanic turbulence." *Journal of Maritime Research*, 8 (3), 199-225.
- Stull RB. (1950) "An introduction to boundary layer meteorology." Ed. Klumer Academic Publishers.(1993) 3° de., pp 666.
- Tarquis AM, Platonov A, Matulka A, Grau J, Sekula E, Díez M y Redondo JM (2011) "Application of multifractal analysis to the study of SAR features and oil spills in the ocean surface." *Non-Linear Processes in Geophysics 2011*, npg-2010-123
- Taylor GI. (1931) "Diffusion by continuous movements." *Proc. of the London Math. Soc.* vol. 20, 196-212.
- Taylor GI. (1932) "The transport of vorticity and heat through fluids in turbulent motion." *Proc. Roy. Soc. A* 135, 685-705.
- Taylor GI (1935). *Statistical theory of turbulence*, I-IV. *Proc. R. Soc. London Ser. A* 151 : 421-78.
- Thornton EB. (1970) "Variation of Longshore Currents Across the Surf Zone." *Proc. Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE*, 12, 291-308.
- Thornton E. B. & Guza, R.T (1983) "Transformation of wave height distribution." *J. Geophys. Res.*, 88, 5925-5938.
- Tritton DJ. (1989) "Physical fluid dynamics." Oxford University Press.
- Tsubaki R y Fujita I. (2005) "Stereoscopic measurement of a fluctuating free surface with discontinuities." *Meas. Sci. Technol.* 16, 1894–1902.
- Turner JS. (1973) "Buoyancy Effects in Fluids" Cambridge Univ. Press.
- Von Karman T, Howarth L. (1938). "On the statistical theory of isotropic turbulence." *Proc. R. Soc. London Ser. A* 164: 192-215.
- Walton T. (1993) "Ocean City, Maryland, wave runup study." *Journal of Coastal Research*, 9, (1), 1-10.
- Wanek JM y Wu CH. (2006) "Automated trinocular stereo imaging system for 3D surface wave measurements." *Ocean Engineering* 33, 723–747.
- Wiegel RL. (1947) "Recognition of underwater obstructions from aerial photography." *Wave Proj. Rep. HE-116-248*, Univ of Calif., Berkeley , 32 pp.
- Yao A, Wu Ch. (2004) "An automated image-based technique for tracking sequential surface wave profiles." *Ocean Engineering* 32, 157–173.
- Zamora J. (2003) "La desgracia del Prestige" http://marenostrom.org/ecologia/medio_ambiente/prestige/desgracia3.htm
- Zeidler R. (1976) "Coastal dispersion of pollutants." *Journal of Waterways, Harbour and Coastal Engineering, ASCE*, vol. 102, ww2, 235-254.
- Zeidler R. (1978) "Sea turbulence spectrum." *Oceanologia*, N°9, pp. 161-179.
- Zipf GK (1949). "Human Behaviour and the Principle of Least Effort." 2nd edn Hafner Publishing Company. New York, reprinted 1972.

ANNEXO 1: TEORÍA DE LA TURBULENCIA.

A.1 INTRODUCCIÓN A LA TURBULENCIA

En dinámica de fluidos se clasifican los flujos entre laminares y turbulentos en función del número de Reynolds, según predominen las fuerzas inerciales o las viscosas. El fluido laminar sigue un comportamiento predecible, sin mezcla y con trayectorias lineales mientras que el flujo turbulento es aleatorio, formando remolinos y produce mezcla y difusión a un ritmo mucho mayor que en el caso laminar. Como ejemplo se ve en la figura A.1 de un flujo turbulento.

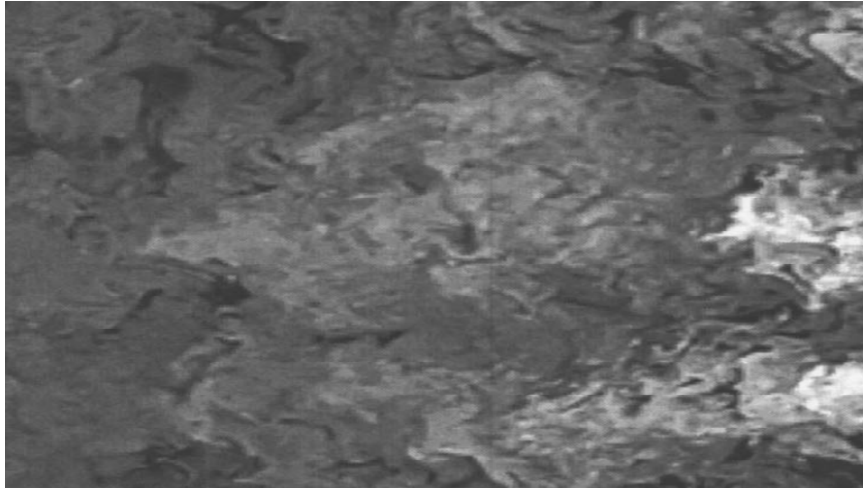


Figura A.1. Flujo turbulento.

Se entiende, de forma general, como **Turbulencia totalmente desarrollada** aquella turbulencia *isótropa y homogénea* donde el flujo presenta un estado de desorden caótico *con estructuras en todas las escalas* que aparece ante la vista como una estructura de trayectorias incoherentes pero uniforme en el espacio. Esta definición, usada en la teoría matemática de la turbulencia presenta algunas limitaciones en turbulencia geofísica donde la no-homogeneidad es importante.

Las ecuaciones de Navier-Stokes no pueden resolverse totalmente debido a la aparición de los tensores de Reynolds y a que siempre hay más incógnitas que ecuaciones, es decir presentan un problema de cierre, por lo que se recurre a simplificaciones, como por ejemplo, considerar.

- isotropía y homogeneidad, para poder trabajar con medias y fluctuaciones alrededor de esas medias, como. la aproximación de Boussinesq donde se disipan las fuerzas de inercia.
- que el flujo a distintas escalas está en equilibrio local.
- que tenemos un fluido barotrópico, la temperatura no interviene en la ecuación cinética de estado y la densidad y presión no producen vorticidad.

$$-\nabla p + \nabla \nu \nabla \bar{v} + \bar{b} = \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{v} \nabla \bar{v} \quad (\text{Ec. A-1})$$

Siendo p la presión termodinámica, ν es la viscosidad cinemática y b el vector que aglutina las fuerzas másicas

Para flujo incompresible, o sea que las ondas de presión viajan a velocidad infinita,

$$\nabla v = 0 \quad (\text{Ec. A-2})$$

Tenemos un sistema no-lineal de cuatro ecuaciones:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) v_x + b_x &= \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) & \text{(Ec. A-3)} \\ -\frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) v_y + b_y &= \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_y \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \\ -\frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) v_z + b_z &= \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_z \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} &= 0 \end{aligned}$$

Considerando que las fuerzas másicas son conservativas, y por lo tanto, su rotacional es nulo si obtiene la ecuación de la vorticidad, definida como el rotacional de la velocidad

$$\boldsymbol{\omega} = \text{rot}(\mathbf{v}) = \nabla \times \mathbf{v} \quad \text{(Ec. A-4)}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{\omega}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \boldsymbol{\omega} = (\boldsymbol{\omega} \cdot \nabla) \mathbf{v} + \nabla \nu \nabla \boldsymbol{\omega} \quad \text{(Ec. A-5)}$$

A.2 DESCRIPCIÓN INTEGRAL A DISTINTAS ESCALAS

La descripción global de una propiedad f en la escala L considerada, se denota por los corchetes y se define por

$$\langle f \rangle \equiv \frac{1}{L^3} \int_{B_L} f(\mathbf{r}) d\mathbf{r} \quad \text{(Ec. A-6)}$$

Es importante resaltar que no es exacto hablar de leyes de conservación cuando están aplicadas sobre una ecuación (la de *Navier-Stokes*) que es intrínsecamente disipativa desde un punto de vista conceptual y por tanto siempre debemos restringirnos a la escala de estudio y en situaciones de equilibrio (Frish, 1995). Tenemos entonces las siguientes ecuaciones de conservación.

$$\text{Conservación del momento:} \quad \frac{d}{dt} \langle \mathbf{v} \rangle = 0 \quad \text{(Ec. A-7)}$$

$$\text{Conservación de la energía:} \quad \frac{d}{dt} \left\langle \frac{1}{2} |\mathbf{v}|^2 \right\rangle = -\nu \langle |\boldsymbol{\omega}|^2 \rangle + \mathbf{F} \quad \text{(Ec. A-8)}$$

Conservación de la helicidad:

$$\frac{d}{dt} \left\langle \frac{1}{2} \mathbf{v} \cdot \boldsymbol{\omega} \right\rangle = -\nu \langle \boldsymbol{\omega} \cdot \nabla \times \boldsymbol{\omega} \rangle + \mathbf{F} \quad (\text{Ec. A-9})$$

donde el término \mathbf{F} representa las aportaciones de las fuerzas externas, de manera genérica. Para considerarse estrictamente leyes de conservación el término de forzaje \mathbf{F} debe compensar la disipación por la viscosidad, o bien tanto este término como la viscosidad del fluido sean nulas.

Esta claro que en caso de turbulencia medioambiental, a un número de Reynolds alto, estas condiciones no se cumplen, sin embargo es útil considerar los siguientes invariantes:

Energía

$$E \equiv \left\langle \frac{1}{2} |\mathbf{v}|^2 \right\rangle \quad (\text{Ec. A-10})$$

Enstrofia

$$\Omega \equiv \left\langle \frac{1}{2} |\boldsymbol{\omega}|^2 \right\rangle \quad (\text{Ec. A-11})$$

Helicidad

$$H \equiv \left\langle \frac{1}{2} \mathbf{v} \cdot \boldsymbol{\omega} \right\rangle \quad (\text{Ec. A-12})$$

Helicidad Vortical

$$H_{\omega} \equiv \left\langle \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega} \cdot \nabla \times \boldsymbol{\omega} \right\rangle \quad (\text{Ec. A-13})$$

La aplicación de esta notación permite escribir las leyes de conservación de la energía y la helicidad de la siguiente manera simplificada:

$$\frac{d}{dt} E = -2\nu\Omega \quad (\text{Ec. A-14})$$

$$\frac{d}{dt} H = -2\nu H_{\omega} \quad (\text{Ec. A-15})$$

Por último, se introduce la cantidad conocida y utilizada ampliamente en turbulencia como *disipación de la energía*, definida como

$$\varepsilon \equiv -\frac{dE}{dt} \quad (\text{Ec. A-16})$$

Estos conceptos se aplican a la turbulencia descomponiendo el campo de velocidades en las ecuaciones de gobierno del problema, mediante la aplicación de un operador denominado de *low-pass filtering*, definido como

$$P_K : f(\mathbf{r}) \mapsto f_K^<(\mathbf{r}) \quad (\text{Ec. A-17})$$

Si se aplica el operador a la ecuación de *Navier-Stokes* y a la de *continuidad*, y se descompone la velocidad según el parámetro K , se obtiene

$$-\nabla p_K^< + \nu \Delta \mathbf{v}_K^< + \mathbf{b}_K^< = \frac{\partial \mathbf{v}_K^<}{\partial t} + P_K^< \left((\mathbf{v}_K^< + \mathbf{v}_K^>) \cdot \nabla (\mathbf{v}_K^< + \mathbf{v}_K^>) \right) \quad (\text{Ec. A-18})$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v}_K^< = 0 \quad (\text{Ec. A-19})$$

Tomando el producto escalar de las anteriores con $\mathbf{v}_K^<$, considerando las medias y tras una serie de operaciones algebraicas, se deriva en una expresión para la variación de la energía asociada a las escalas de filtro *lowpass* de la velocidad. La importancia de esta expresión es que en ella no desaparece el término no lineal de las ecuaciones de gobierno, pudiendo ahora acometer una interpretación del mismo en el funcionamiento energético de la turbulencia. La expresión que se consigue es la siguiente, (Frish, 1995):

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left\langle \frac{1}{2} |\mathbf{v}_K^<|^2 \right\rangle + \left\langle \mathbf{v}_K^< \cdot [(\mathbf{v}_K^< + \mathbf{v}_K^>) \cdot \nabla (\mathbf{v}_K^< + \mathbf{v}_K^>)] \right\rangle \quad (\text{Ec. A-20}) \\ & = - \left\langle \mathbf{v}_K^< \cdot \nabla p_K^< \right\rangle + \nu \left\langle \mathbf{v}_K^< \cdot \Delta \mathbf{v}_K^< \right\rangle + \left\langle \mathbf{v}_K^< \cdot \mathbf{b}_K^< \right\rangle \end{aligned}$$

Desarrollando el término no lineal e introduciendo nueva notación, la expresión anterior puede resumirse como

$$\frac{\partial}{\partial t} \xi_K + \Pi_K = -2\nu\Omega_K + \mathbf{F}_K \quad (\text{Ec. A-21})$$

En la que los nuevos términos corresponden a

Energía acumulada entre los valores de número de onda ($K=2\pi/L$) 0 y k

$$\xi_K \equiv \frac{1}{2} \left\langle |\mathbf{v}_K^<|^2 \right\rangle = \frac{1}{2} \sum_{k \leq K} |\hat{\mathbf{v}}_k^<|^2 \quad (\text{Ec. A-22})$$

Enstrofía acumulada

$$\Omega_K \equiv \frac{1}{2} \left\langle |\boldsymbol{\omega}_K^<|^2 \right\rangle = \frac{1}{2} \sum_{k \leq K} k^2 |\hat{\mathbf{v}}_k^<|^2 \quad (\text{Ec. A-23})$$

Inyección de energía acumulada

$$\mathbf{F}_K \equiv \left\langle \mathbf{v}_K^< \cdot \mathbf{b}_K^< \right\rangle = \sum_{k \leq K} k^2 |\hat{\mathbf{v}}_k^<|^2 \quad (\text{Ec. A-24})$$

Flujo de energía a través de K

$$\Pi_K \equiv \left\langle \mathbf{v}_K^< \cdot (\mathbf{v}_K^< \cdot \nabla \mathbf{v}_K^>) \right\rangle + \left\langle \mathbf{v}_K^< \cdot (\mathbf{v}_K^> \cdot \nabla \mathbf{v}_K^>) \right\rangle \quad (\text{Ec. A-25})$$

Se puede proceder ahora a la interpretación conceptual del resultado. La expresión anterior nos indica que la variación en el tiempo de la energía de las escalas superiores a la escala correspondiente a k escogida es igual a la inyección de energía proveniente de las fuerzas aplicadas, menos la energía disipada por la viscosidad en ese rango de escalas, menos el trasvase de energía del rango de escalas considerado

hacia el rango de escalas inferiores (este es el término no lineal de la expresión). Este trasvase es el que da lugar al concepto de *cascada de energía*, básico en la comprensión de los mecanismos que gobiernan el fenómeno turbulento. También es importante darnos cuenta de la hipótesis de localidad, que no permite que la energía a una escala pase a otras muy distintas.

A.3 CASCADA DE ENERGÍA Y INTERMITENCIA

A.3.1 Cascada de energía

El modelo conceptual clásico fue establecido por Richardson en 1921. Si se analiza la energía respecto el número de onda se observan claramente tres zonas:

- Inicialmente la energía aumenta con el número de onda, generando oleaje y vorticidad, hasta que la turbulencia se desarrolla completamente. Por ello decimos que se inyecta energía al sistema.
- En una etapa intermedia se produce una transferencia de energía de las escalas mayores a las menores, se rompen los remolinos transformándose en otros menores mediante las interacciones no lineales. La idea básica es la existencia de esta jerarquía en la escala de los remolinos. Las fuerzas inerciales dominan sobre la viscosidad, y se produce la inyección de energía al sistema.
- Finalmente, esta turbulencia completamente desarrollada llega a una escala inferior, llamada de Kolmogorov, donde la disipación de energía está dominada por la disipación viscosa.

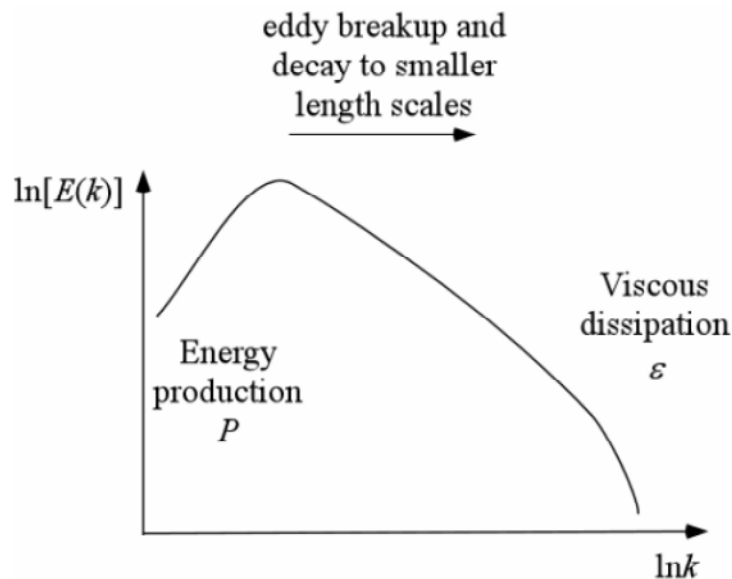


Figura A-3. Distribución de energía según el número de onda k .

A.3.2 Disipación viscosa

A partir del modelo sin intermitencia (Richardson 1922) Taylor estableció que la transferencia de energía desde las escalas superiores a las inferiores depende del cuadrado de la velocidad característica los remolinos de la escala superior y de su período característico (cociente de la velocidad característica y su escala característica, con dimensiones consistentes con la ec 1.16), del siguiente modo:

$$\varepsilon = C \frac{u^3}{\ell} \quad (\text{Ec. A-26})$$

Esta aproximación permite el cálculo de las transferencias de energía entre escalas partiendo de escalas donde la viscosidad juega un papel muy poco relevante, y suponiendo que no hay intermitencia y por tanto ε es constante a todas las escalas.

Sobre este razonamiento Kolmogorov en 1941 plantea que en un flujo turbulento totalmente desarrollado las características estadísticas del mismo tan sólo pueden depender de la viscosidad ν y de la tasa de disipación de energía por unidad de masa ε .

A.3.3 Rango inercial

Según la cascada de energía existe una escala característica, llamada escala de Kolmogorov, para la cual la viscosidad deja de ser relevante frente a las fuerzas inerciales, que a partir de un análisis dimensional propone como:

$$\eta_k \approx \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{1/4} \quad (\text{Ec. A-27})$$

Lo cual deja establecido un subrango inercial de energía turbulenta en cuyas escalas la viscosidad no es dominante y su efecto puede ser despreciado frente al de las fuerzas inerciales.

Esto permite discernir el número de onda k a través de los cuales entra la energía al sistema, partiendo de la escala mayor l , y terminando en la escala de Kolmogorov, donde se considera la disipación de la energía del sistema por medio de la viscosidad

$$l^{-1} < k < \eta_k^{-1} \quad (\text{Ec. A-28})$$

Una vez realizado este cálculo, este mismo análisis puede llevarse a efecto con otras variables para encontrar sus respectivos valores característicos de Kolmogorov. Así pues, pueden hallarse también tanto el período de tiempo característico como la velocidad característica asociados a la escala de Kolmogorov, que resultan en:

$$\tau_k \approx \left(\frac{\nu}{\varepsilon} \right)^{1/2} \quad (\text{Ec. A-29})$$

$$v_k \approx (\nu\varepsilon)^{1/4} \quad (\text{Ec. A-30})$$

La aplicación del análisis al espectro de energía, la cantidad de energía asociada a cada frecuencia o número de onda, a lo largo de toda la señal turbulenta, supone que como la energía contenida en el rango de escala inercial sólo puede ser dependiente de la tasa de disipación de energía por unidad de masa ε y de la escala en sí misma (el número de onda k), llegando a la expresión conocida universalmente como la ley de los $-5/3$ de Kolmogorov”

$$E(k) \approx C \cdot \varepsilon^{2/3} \cdot k^{-5/3} \quad (\text{Ec. A-31})$$

A.3.4 Efecto del empuje (b)

En el caso de existir diferencias de densidad con capas de mezcla, se dan inestabilidades baroclinas donde claramente existe una no-homogeneidad local. Así que el razonamiento anterior debe modificarse, al menos añadiendo un nuevo concepto debido al empuje, que hace que no se pueda hacer la hipótesis de homogeneidad e isotropía.

Se define una capa de mezcla como aquella zona que, por la generación de inestabilidades, provoca una mezcla de sus propiedades, presentando una cierta homogeneidad dentro de un ámbito inicialmente estratificado. El límite de una capa de mezcla viene determinado por la zona donde pueden reconocerse gradientes elevados.

Las inestabilidades, por lo general turbulentas, que generan las capas de mezcla con estratificación, pueden clasificarse principalmente en los siguientes tipos:

- *Inestabilidad de Kevin-Helmholtz*, que es producida por gradientes de velocidad en una interfase de densidad. Las fuerzas inerciales son desestabilizadores y la densidad estabilizadora. La eficiencia suele ser baja o moderada.
- *Inestabilidad de Rayleigh-Taylor*, que se produce cuando dos fluidos de distinta densidad son acelerados uno contra otro. Por ejemplo en fluidos estratificados inestablemente, un fluido ligero bajo otro más denso, se generan flujos convectivos dominados por los empujes desestabilizadores, y la inercia y viscosidad son estabilizadores. Otro ejemplo es la inyección local de energía puntual, como la rotura de una onda interna contra la interfase. La eficiencia de la mezcla en este caso suele ser muy alta.
- *Inestabilidad de Holmboe*, que se producen cuando una inestabilidad local se mantiene en un entorno en el que la cizalladura no es dominante, generando ondas simétricas que pueden romper dando lugar a turbulencia y a mezcla local.
- Ruptura de Ondas Internas
- Penetración de Vórtices Bipolares.

Existen zonas paramétricas donde se dan casos intermedios, como los filamentos proyectados por ondas solitarias, a medio camino entre las Holmboe y las K-H (Redondo, 1990) y (Fraunie et al. 2008)

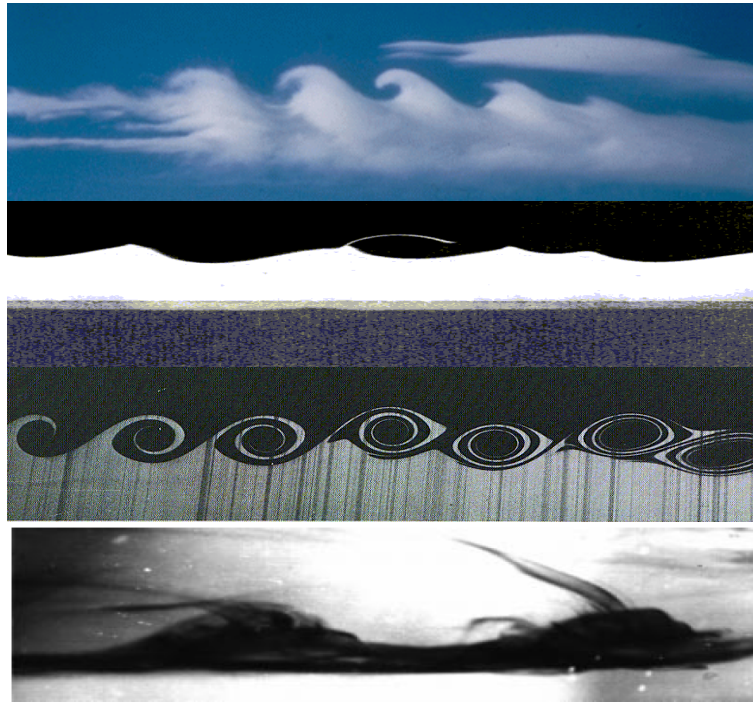


Figura A-4. Inestabilidades de densidad.

Los mecanismos de producción de inestabilidades turbulentas en el ámbito geofísico son muchos y variados, algunos de los cuales serían:

- Resonancia y ruptura de ondas internas
- Generación de vorticidad en ondas de sotavento
- Absorción de energía de cizalla por parte de flujos dominantes
- Doble difusión por diferencias difusividad de la salinidad y temperatura
- Ascensión térmica por calentamiento del terreno
- Agitación superficie del mar debida al viento
- Otros...

El aparato teórico clásico que trata sobre la influencia de la estratificación en las dinámicas turbulentas y viceversa se basa en el análisis de una serie de parámetros adimensionales, denominados descriptores. Se analiza en lo sucesivo el carácter, relevancia y expresiones de estos números adimensionales (Ri , Ro , Ra , Sc ,...).

A.3.5 Definición de intermitencia

Al tener en cuenta todo el espacio, que no va a estar necesariamente lleno de energía, de forma uniforme a todas las escalas como en la hipótesis de homogeneidad y isotropía (figura A-2 izquierda), se introduce el concepto de la **intermitencia** de ocupación topológica del espacio de forma no uniforme (figura A-2 derecha).

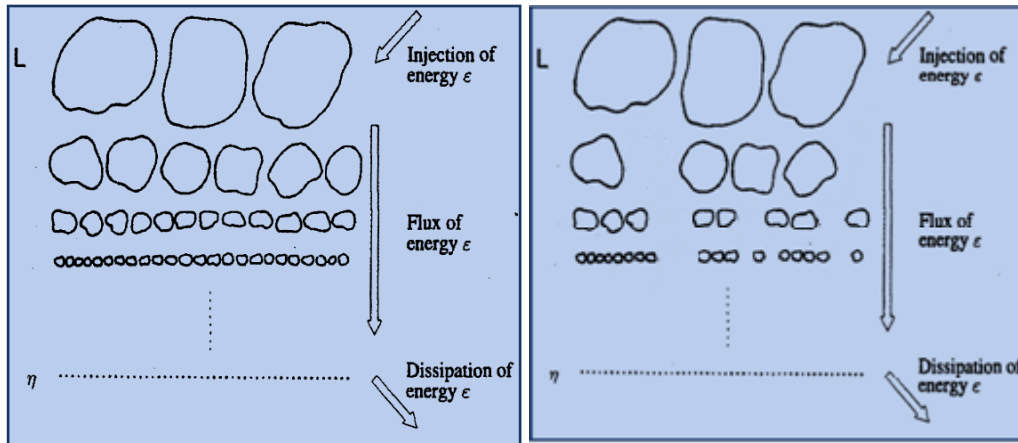


Figura A.2. Cascada del flujo de energía en distintas escalas asumiendo condiciones isotrópicas (izquierda) y con intermitencia (derecha).

A.3.6 Funciones de estructura

La función de estructura de la velocidad de orden p en el tiempo es:

$$S_p(\tau) = \langle |u(t + \tau) - u(t)|^p \rangle \tag{Ec A.32}$$

Y si se define espacialmente sería:

$$S_p(l) = \langle |u(x + l) - u(x)|^p \rangle \tag{Ec A.33}$$

Donde $\langle \rangle$ es el operador media y u es la componente de velocidad paralela a l. En la primera aproximación de Kolmogorov k41, para números de Reynolds altos, la función de estructura de la velocidad obedece en el rango inercial. Entre la escala integral y la escala de Kolmogorov tendremos de forma general :

$$S_p(l) = c \epsilon_0^{p/3} l^{p/3} \tag{Ec A.34}$$

Donde ϵ_0 es la media de la energía de disipación. Para turbulencia homogénea e isotrópica $\epsilon_0 = 15\nu \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2$ siendo ν la viscosidad cinemática.

Para el tercer orden de las funciones de estructura, en el rango inercial se obtiene la ley de Kolmogorov de los 4/5, $S_3(l) = -(4/5)\epsilon_0 l$

Como la disipación no tiene porqué ser constante a las distintas escalas, tal y como Landau criticó la teoría K41, el propio Kolmogorov introdujo una modificación suponiendo que hay una dependencia de la disipación con la escala de forma.

$$\varepsilon(\ell) \propto \langle \varepsilon_0 \rangle \ell^{\tau_p} \quad \text{Ec A.35}$$

donde $\varepsilon(\ell)$ es la media de la tasa de disipación de energía en un volumen de dimensión ℓ .

Aplicando esta dependencia de la disipación con la escala a una distribución no homogénea de la energía tenemos para la función de estructura de orden p

$$S_p(\ell) = c(p, \varepsilon_0) \langle \varepsilon_0 \rangle^{p/3} \ell^{\zeta_p} \quad \text{Ec A.36}$$

y ζ_p es el exponente de escala absoluto que incluye una dependencia espacial de ε_i y por tanto

$$\zeta_p = p/3 + \tau_p \quad \text{Ec A.37}$$

Como el exponente de Holden nos da la relación de escalas en la velocidad de forma $v(\ell) = c v(\eta_k) \ell^H$

Para escalas comprendidas entre la integral y la de Kolmogorov tenemos que $H = 1/3 - (3-D)/3$ de forma que la relación espectral modificada por la intermitencia será:

$$E(k) = c'(\varepsilon_0) k^{-\left(\frac{5}{3} + \frac{3-D}{3}\right)} \quad \text{Ec A.37}$$

Siendo la intermitencia para orden p , μ_p

$$\mu_p = (3-D)(1-p/3) \quad \text{Ec A.38}$$

y siguiendo a Sekula y Redondo (2008) se puede definir una intermitencia generalizada para los distintos ordenes de las funciones de estructura como:

$$\mu_p = 2\zeta_{p/2} - \zeta_p \quad \text{Ec A.39}$$

Estas definiciones de intermitencia coinciden con la utilizada usualmente para $p=6$, $\mu=2-\zeta_6$ o también para la intermitencia introducida por Frish $\mu'=4/3-\zeta_4$.

A.4 ANÁLISIS FRACTAL Y MULTIFRACTAL

A.4.1 Definición de dimensión fractal

La observación experimental de que las leyes de escala en la turbulencia dependen del tamaño llevó al uso de los modelos de fractal (Mandelbrot 1985) y multifractal de la turbulencia (Frisch, 1995). Relacionando los modelos espectrales (espacio de Fourier) con los geométricos (espacio fractal) surgió el concepto de la intermitencia.

Mandelbrot 1985 dio definiciones prácticas de la dimensión fractal de objetos reales, los objetos fractales, como una auto- semejanza en un rango. La dimensión de Hausdorff se puede utilizar para describir los objetos físicos en una gama limitada, donde se puede aplicar autosimilitud, como en rango de la cascada de energía turbulenta entre la mayor escala y la de Kolmogorov.

La dimensión fractal D_i se define como:

$$D_i = \frac{\log N}{\log \left(\frac{1}{\sigma} \right)} \quad (\text{Ec. A-40})$$

donde N es el número de partes similares o cajas que cubren un tamaño σ .

A.4.2 Análisis multifractal

Una extensión de la dimensión fractal para un conjunto de isolíneas genera un conjunto de diferentes dimensiones fractales, de ahí su nombre de multifractal. Para una curva fractal, la L mide la longitud y tendrá una dependencia de la ley de potencia en el criterio de medición como:

$$L \propto \sigma^{1-D_i} \quad (\text{Ec. A-41})$$

El exponente D_i se llama la dimensión fractal de la curva y es una medida de la rugosidad según la fragmentación de la curva y tienen el subíndice $i = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ representa la dimensión euclidiana del espacio de incrustación. La convolución fractal de las interfaces incrementará el área entre las diferentes regiones marcadas del flujo. En forma similar al anterior se puede expresar el área determinada por el conjunto fractal como:

$$A \propto \sigma^{2-D_2} \quad (\text{Ec. A-42})$$

Si el rango de escalas donde hay auto-similitud está limitada por una escala mayor y una menor, como la de Kolmogorow η_k el incremento de la superficie A_i , de una interfaz de turbulencia debido al comportamiento fractal a escala l es

$$A_l \left(\left(\frac{l}{\eta} \right)^{2-D_2} - 1 \right) \quad (\text{Ec. A-43})$$

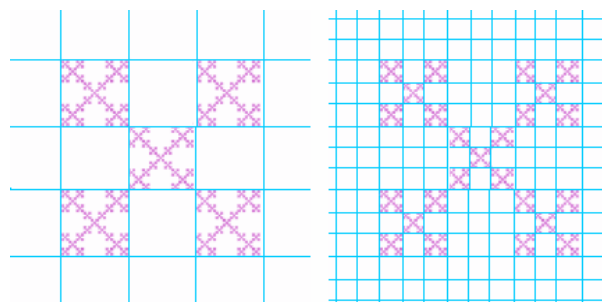
Este aumento de la superficie de contacto debe ser tenido en cuenta cuando se mezclan a través de interfaces de densidad. Este descriptor geométrico es útil en grandes dimensiones fractales, generalmente en flujos muy convolucionados. El análisis multifractal permite la parametrización de la eficiencia de mezcla de las inestabilidades básicas.

Por ejemplo, si se realiza un recuento de algoritmo de conteo de recuadros a la energía y los contornos de la vorticidad diferente de la turbulencia en descomposición de la estela de una interfaz (Redondo et al. 2009). Nos damos cuenta de que el flujo está dominado por vórtices cada vez menos considerados como estructuras coherentes y, al mismo tiempo, el espectro se vuelve más no-local (es decir, más pronunciada), la dimensión fractal disminuye a medida que cuenta Redondo (1990) y et Vassilicos et al.

A.4.3 El método BOX-COUNTING

El software de *Ima-Calc* se usa aquí para calcular la dimensión fractal de imágenes a través de un algoritmo de conteo de recuadros, BOX COUNTING. Además, incluye herramientas sencillas de procesamiento y análisis de imágenes.

Se considera cuadrícula de lado h y se cuenta el número de cajas que no están vacías. Cuanto menores son las cajas, más detalle, lo que es lo mismo que el aumento de la ampliación e , que es igual a $1/h$. La fórmula de la dimensión fractal es $D_f = \log n / \log e$. Si h es más pequeño, la dimensión será más precisa. Para 3-D fractales podemos hacer lo mismo con cubos en lugar de cuadrados, y para el 1-D fractales podemos usar segmentos de línea.



FiguraA-5. The Box-counting.

La dimensión fractal se puede relacionar con el espectro de frecuencias o el espectro espacial obtenido con la transformada de Fourier de funciones de correlación de tiempo o espaciales ya que el espectro de la dimensión fractal se puede derivar si el trazador es adveccionado pasivamente por un flujo turbulento. Así la dimensión fractal puede relacionarse con la energía de la turbulencia según una dependencia espacial o temporal, y el exponente del espectro de frecuencias, en un subrango inercial, es una función de la dimensión fractal de conteo de recuadros, según Redondo (1990).

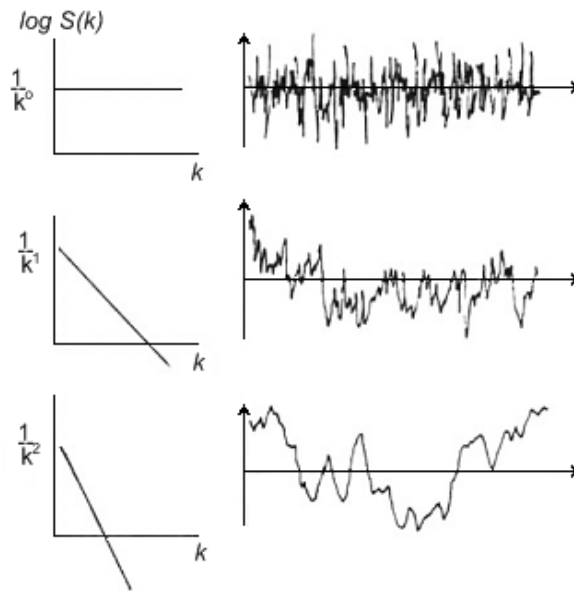


Figura A-6. Relación entre la pendiente del espectro y la señal.

En la figura A-6 podemos ver la dependencia entre la estructura de la señal y su espectro de Fourier, las tres señales que corresponden a ruidos (arriba), a movimiento browniano fraccional cercano a turbulencia (centro) y movimiento browniano suave (abajo). Los espectros más apuntados están dominados por el bajo número de onda (grandes olas) y las estructuras no-locales.

A.4.4 Función de densidad espectral

Si asumimos que el espectro de frecuencias tiene una forma bien definida en un rango importante de frecuencias, como $(E(k) \propto k^{-p})$

$$S(f) = f^{-p} \tag{Ec. A-44}$$

Utilizando la variación de la señal $\rho(t)$ se define a partir de:

$$V(T) = \langle (\rho(t+T) - \rho(t))^2 \rangle \tag{Ec. A45}$$

Donde $\langle \rangle$ es la media del periodo la dependencia fractal para series temporales $V(T) \approx T^{2H}$ la descripción de la función de densidad espectral S(f):

$$S(f) \approx T^p \tag{Ec. A-46}$$

$$S \propto T \int_0^T \rho^2(t) e^{-ift} dt \approx TV \tag{Ec. A-47}$$

por lo que

$$S(f) \approx TV \approx T^{2H+1} \approx T^{2E_u+1-2D} \tag{Ec. A-48}$$

Así la relación entre el exponente de la función de densidad espectral y la dimensión fractal es:

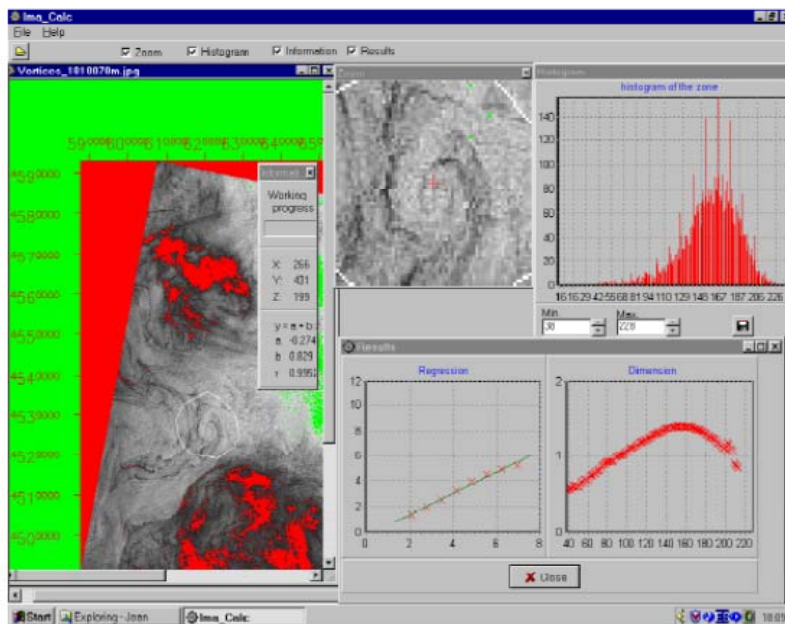
$$p = 2E_u + 1 - 2D_{E_u} \qquad D_{E_u} = E_u + \frac{1-p}{2} \tag{Ec. A-49}$$

Estas equivalencias geométrico-dinámicas pueden servir para verificar metodologías de cálculo de la dimensión fractal. El análisis multifractal da aún más información sobre el aumento de los niveles de intensidad diferentes de la imagen. Cada conjunto de valores da una propiedad de imagen, que en el caso de la imagen SAR indica la rugosidad de la superficie, de la temperatura en el caso de imágenes infrarrojas, o la concentración de un trazador.

Cada imagen tiene una dimensión fractal D_E en un espacio euclídeo E_u que expresa el nivel de auto-semejanza en el espacio. Para calcular la dimensión fractal máxima el método de conteo de recuadros que da cobertura del objeto y el método más simple es que la caracterizan con las cajas de lado e , cuadrados o cubos. La distribución sistemática muestra que tenemos cajas con una intersección o no, vacías.

$$D_{E_u}(i) = - \frac{\ln N(e,i)}{\ln e(i)} \tag{Ec. A-50}$$

Si obtenemos la dimensión fractal para cada nivel de intensidad se obtiene una caracterización multi-fractal de la característica en estudio. En la figura A-7 se muestra un análisis típico de la estructura multifractal de un vórtice con programa ImaCalc, Grau et al.



Descripción de un análisis multifractal de un vórtice con ImaCalc

A.4.5 Aplicación de análisis MultiFractal a contornos.

Las medidas multifractales son principalmente medidas de una distribución estadística por lo que los resultados proporcionan información útil, incluso si la estructura subyacente no muestra un comportamiento similar o afín sí mismo como lo demuestra Plotnick et al. Para un objeto mono-fractal, como se mencionó anteriormente, el número n de las características de un determinado tamaño δ varía como

$$N(\delta) \propto \delta^{-D_0} \quad , \quad (\text{Ec. A-51})$$

donde la dimensión fractal D_0

$$D_0 = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log N(\delta)}{\log \frac{1}{\delta}} \quad (\text{Ec. A-52})$$

puede medirse contando el número n de cajas necesarias para cubrir el objeto a investigar para aumentar tamaño de las cajas δ y la estimación de la pendiente de una gráfica log-log.

Existen varios métodos para la aplicación del análisis multifractal, usamos el del momento, que usa 3 funciones $\tau(q)$ la función de exponente de masa, α conocido como el exponente Hölder grueso y $f(\alpha)$ el espectro multifractal. Para que un campo en un soporte 2D de $L \times L$ píxeles de la imagen, μ (se puede considerar como el tono gris de 0 a 255 en una imagen de 8 bits), se podría descomponer espacialmente en términos de una infinidad de conjuntos entrelazados de las dimensiones fractales. En ese caso, una dimensión fractal no puede caracterizar toda la complejidad y varias dimensiones fractales se calcula en función de la posición.

Aplicando función de partición $\chi(q, \delta)$:

$$\chi(q, \delta) = \sum_{i=1}^{n(\delta)} \mu_i^q(\delta) = \sum_{i=1}^{n(\delta)} m_i^q \quad (\text{Ec. A-53})$$

Donde m es la masa de la medida, q es el exponente de la masa, δ el tamaño de la longitud de la caja y $n(\delta)$ el número de cajas. Sobre esta base, la función exponente de la masa $\tau(q)$ muestra cómo los momentos se escalan el tamaño de la caja:

$$\langle \tau(q) \rangle = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log \langle \chi(q, \delta) \rangle}{\log(\delta)} = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log \langle \sum_{i=1}^{n(\delta)} m_i^q \rangle}{\log(\delta)} \quad (\text{Ec. A-46})$$

donde $\langle \rangle$ representa momento estadístico de la medida, $\mu_i(\delta)$ definido en un grupo de cuadros no superpuestos del mismo tamaño de la partición del área estudiada D_q de manera que $\tau(q) = (1 - q)D_q$.

Esta caracterización de las medidas multifractales generalizada se corresponde a los exponentes de escala para el momento de la medida. Basado en el trabajo de Rényi (1955) se definen como:

$$D_q = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{1}{1-q} \frac{\log \sum_{i=1}^{n(\delta)} m_i^q}{\log \delta} \quad (\text{Ec. A-54})$$

El índice de singularidad α puede determinarse como la transformada de Legendre de la :

$$\langle \alpha(q) \rangle = \frac{d \langle \tau(q) \rangle}{dq} \quad (\text{Ec. A-55})$$

El número de células de tamaño δ con el mismo α se relaciona con el tamaño de la celda como $n_\alpha(\delta) \propto \delta^{-f(\alpha)}$ donde $f(\alpha)$ es un exponente de escala de las células con común α :

$$\langle f(\alpha) \rangle = q \langle \alpha(q) \rangle - \langle \tau(q) \rangle \quad (\text{Ec. A-56})$$

Espectro multifractal (MFS), una función $f(\alpha)$ caracteriza cuantitativamente la variabilidad de la medida estudiada. La asimetría de derecha y la izquierda indica el dominio de valores pequeños y grandes, respectivamente. El ancho del espectro de MF indica la variabilidad total.

MFA en imágenes 2-D consiste en dividir el plano en las cajas para la construcción de muestras con múltiples escalas. El método combina píxeles para formar cajas mayores mutuamente excluyentes de manera que cada juego contiene diferentes de píxeles. Si tenemos una imagen de $L \times L$ píxeles y se aplica una partición de cajas $\delta \times \delta$ entonces el número de cajas N de tamaño lineal seguirá la proporción:

$$N(\delta) \propto \left(\frac{L}{\delta}\right)^2, \quad (\text{Ec. A-57})$$

δ es mayor cuanto mayor sea el número de muestras necesarias para llevar a cabo un análisis estadístico de convergencia.

A.5 EFECTOS DE ESCALA

A.5.1 Análisis dimensional

Para comparar las escalas de la difusión molecular y turbulenta comparamos la difusión de un gas en una habitación con dimensión L . A partir de la ecuación de difusión se puede estimar el orden de magnitud de la diferencia de concentración C después de un tiempo T_m

$$\frac{\delta C}{T_m} \propto D \frac{\delta C}{L^2} \quad (\text{Ec. A-58})$$

Si la velocidad de los remolinos grandes en la sala es de u , la correspondiente escala de tiempo T_t se convierte en:

$$T_t = \frac{L}{u} \quad (\text{Ec. A-59})$$

La relación entre ambas para un coeficiente de difusión D para el aire y una viscosidad cinemática del aire ν del mismo orden de magnitud se puede expresar como:

$$\frac{T_t}{T_m} \propto \frac{L D}{u L^2} = \frac{D}{uL} \propto \frac{\nu}{uL} = \frac{1}{\text{Re}} \quad (\text{Ec. A-60})$$

El transporte turbulento por lo general es mucho más rápido que la difusión molecular. Si nos centramos en los remolinos más pequeños, ε la tasa de disipación de energía por unidad de masa tiene dimensión de $\frac{L^2}{T^3}$, y ν la viscosidad cinemática escala de Kolmogorov de longitud η_k , el tiempo T y velocidad u

$$\eta_k = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{1/4}, T = \left(\frac{\nu}{\varepsilon} \right)^{1/2}, u = (\nu \varepsilon)^{1/4} \quad (\text{Ec. A-61})$$

El número de Reynolds en esta escala demuestra que la viscosidad domina los procesos de esta envergadura.

$$\text{Re} = \frac{u \eta_k}{\nu} = 1 \quad (\text{Ec. A-62})$$

Los grandes remolinos con la longitud y la velocidad de las escalas l y u pierden su energía cuando se han recorrido una distancia del orden de l . El tiempo asociado es l/u . La energía cinética de una unidad de masa es del orden de u^2 , por lo que la energía que una unidad de masa pierde por segundo es u^3/l . En promedio, este debe ser igual a la tasa de ε con los remolinos más pequeños se están disipando su energía cinética inicial,

$$\varepsilon = \frac{u^3}{l} \quad (\text{Ec. A-63})$$

Entonces la relación entre el tamaño de los remolinos pequeños y grandes es

$$\frac{\eta_k}{l} = \left(\frac{\nu^3}{u^3 l^3} \right)^{1/4} = \text{Re}^{-3/4} \quad (\text{Ec. A-64})$$

Con números de Reynolds en el orden de $\text{Re} \approx 10^4$, las escalas de longitud difieren en un orden de 10^3 . Los cálculos numéricos deberían calcular ambos remolinos a la vez, lo que de momento no es posible. Una relación similar se mantiene para las escalas de tiempo:

$$\frac{\tau}{t} = \frac{\tau}{l/u} = \text{Re}^{-1/4} \quad (\text{Ec. A-65})$$

Las velocidades angulares de los remolinos son inversamente proporcionales a las escalas de tiempo. Lo que supone que hay más de disipación de energía en las escalas más pequeñas.

A.5.2 Simplificaciones dimensionales de Navier-Stokes

Incluso los flujos turbulentos son considerados correctamente modelados por simulación numérica directa (DNS) de las ecuaciones de Navier-Stokes (NS) y las ecuaciones de continuidad, que son la simplificación de las leyes de Newton aplicada a un fluido. De hecho contienen simetrías espacio-temporales que no son evidentes a primera vista. La ecuación de NS de forma general es:

$$\partial_t \vec{v} + \vec{v} \nabla \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla \vec{p} + \nu \nabla^2 \vec{v} + \vec{F} \quad (\text{Ec. A-66})$$

donde v es la velocidad, p la presión, F las fuerzas del másicas, ρ la densidad y ν la viscosidad cinemática. Si se introduce un factor de escala λ elevado al exponente H (llamado el factor o el exponente de Hurst (Hurst, 1956), en el campo de velocidades se puede estudiar el comportamiento del sistema bajo las siguientes transformaciones que surgen de un simple cambio de escala

$$v \rightarrow \lambda^H v' \quad (\text{Ec. A-67})$$

$$t \rightarrow \lambda^{1-H} T' \quad (\text{Ec. A-68})$$

$$r \rightarrow \lambda r' \quad (\text{Ec. A-69})$$

$$p \rightarrow \lambda^{2H} p' \quad (\text{Ec. A-70})$$

$$F \rightarrow \lambda^{2H-1} F' \quad (\text{Ec. A-71})$$

Si tenemos en cuenta en la ecuación 5.29, el escalado de las coordenadas en un flujo no viscoso $\nu=0$, la ecuación de Euler queda:

$$\lambda^{2H-1} [\partial_T v + v \nabla v + \nabla p] = 0 \quad (\text{Ec. A-72})$$

la ecuación de Euler se comporta de la misma manera a escalas que la viscosidad tiende a cero. Para ver si esta simetría se conserva cuando la viscosidad está presente, podemos estudiar la siguiente hipótesis:

A) $\nu \rightarrow \lambda^{H+1} \nu$ La viscosidad se escala con otras variables.

B) $\nu = \text{cte}$. La viscosidad es constante a todas las escalas.

hipótesis A) satisface la invariancia de escala para cada valor H , mientras que la hipótesis B) sólo es válida para $H=-1$ Esta simetría se debe a la ley de conservación de la circulación del campo de velocidades. De acuerdo con el principio de la auto-similitud de la ecuación de NS, hay un flujo de energía de una escala a otra hasta que la escala de Kolmogorov, la escala de longitud en la que la disipación viscosa es igual a la disipación de de energía y es el límite inferior para la transferencia de energía. Podemos estudiar la ecuación NS aplicando operadores de proyección cuya función es la de un filtro de paso alto / bajo. De este modo, la ecuación resultante:
Variación de energía + flujo de energía = enstrofía + inyección de energía:

A.5.3 Interpretación física

Se puede interpretar como que la tasa de cambio de la energía a escala hasta una cierta longitud es igual a la energía inyectada a una escala por una fuerza menos la energía disipada en tales escalas y menos el flujo de energía a escalas más pequeñas. Este último término se debe a interacciones no lineales entre las escalas derivadas del término no lineal en la ecuación de NS. Este término no lineal es el responsable de la conducta imprevisible de los flujos turbulentos.

También podemos hacer una interpretación escalar de la ecuación de la difusión y la ecuación de vorticidad asumiendo un término de producción de escalar G y una producción de vorticidad baroclina J

$$J = \frac{1}{\rho^2} \nabla \rho \times \nabla p \tag{Ec. A-73}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = G - (u \cdot \nabla) \rho - D \nabla^2 \rho \tag{Ec. A-74}$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = J - (u \cdot \nabla) \omega + [(\omega + 2\Omega) \cdot \nabla] - \nu_\omega \nabla^2 \omega \tag{Ec. A-75}$$

Podemos escalar.

$$\begin{aligned} r &\rightarrow \lambda r', \dots \dots \dots v \rightarrow \lambda^H v', \dots \dots \dots t \rightarrow \lambda^{1-H} t', \dots \dots \dots \rho \rightarrow \lambda^H \rho', \\ D &\rightarrow \lambda^{H+1} D', \dots \dots p \rightarrow \lambda^0 p', \dots \dots \dots f \rightarrow \lambda^{2H-1} f', \dots \dots G \rightarrow \lambda^{H+H} G' \end{aligned} \tag{Ec. A-76}$$

Sin embargo, para escalar la vorticidad tenemos que considerar la hipótesis A) y B), y generalizar un poco las leyes de similitud para incluir derivadas, integrales, o en general el mayor orden de momentos de escala de otra manera, así que usando la definición de orden qas funciones de estructura en el tiempo $S_q(z) = \langle |u(t+\tau) - u(t)|^q \rangle$

queda: $S_q(z) = C_q \tau^{\xi(q)}$ (Ec. A-77)

exponente de Hurst (Hurst, 1956) generalizado para un orden q se define como:

$$H(q) = \frac{\xi(q)}{q} \tag{Ec. A-78}$$

Para la segunda función de estructura, al igual que la correlación escala la variación de la ecuación A-45 tenemos:

$$u = \lambda^{2H(2)} \tag{Ec. A-79}$$

y para el exponente menor

$$p = 2H(2) + 1 \tag{Ec. A-80}$$

como se menciona en las ecuaciones 5.16 y 5.17, se da una relación entre vorticidad y velocidad:

$$\omega = \vec{\nabla} \times \vec{u} \quad (\text{Ec. A-81})$$

Su comportamiento no es el de un escalar pasivo (Zauri y Babiano 1994) y su escalado no será la misma para $\rho = \lambda^H \rho'$ ni $u = \lambda^H u'$.

En el caso más sencillo usando $[\omega] \equiv T^{-1}$, con una constante $v = v_\omega$

$$\omega = \lambda^{H-1} \omega' \quad (\text{Ec. A-82})$$

Si queremos aplicar esta escala, a la evolución del tamaño del vórtice, sería interesante comparar los espectros con el exponente de Hurst de segundo orden. Según (Tarquis et al. 2009) si $H(2)=1/3$ el exponente de potencia es $p=5/3$ de manera similar para la cascada de enstrofia Kraichnan 2D donde $p=3$ y entonces $H_{2D}(2)=1$.

Si utilizamos la máxima dimensión fractal como Redondo (1990, 1996) la ecuación A-49 queda.

$$p = 2E_u + 1 - 2D_{E_u} \quad (\text{Ec. A-83})$$

para los flujos 3D $p=7-2D_3$ y para flujos 2D $p=5-2D_2$. Así que si $p=5/3$ en un flujo totalmente $D_3=2,66$ y si $p=3$ $D_2=1$. Si en el espectro Kolomogorov $p=5/3$ aparece en un flujo 2D entonces $D_2=1,66$. Ambos tipos de flujos pueden coexistir tanto en la atmósfera y el océano como lo indica Platonov et al. (2008). El papel de la intermitencia daría otros valores.

A.5.4 Aplicación de análisis multifractal

En la figura A.8 se muestra el calculo multifractal utilizando ImaCalc de una mancha de crudo en este caso la distribución de intensidades en la imagen no es continua, tradicionalmente solo se utiliza la dimensión fractal máxima para un determinado nivel de gris en la imagen.

La energía por unidad de masa asociada con el movimiento a la escala de l , respecto la escala integral o mayor escla de referencia l_0 es:

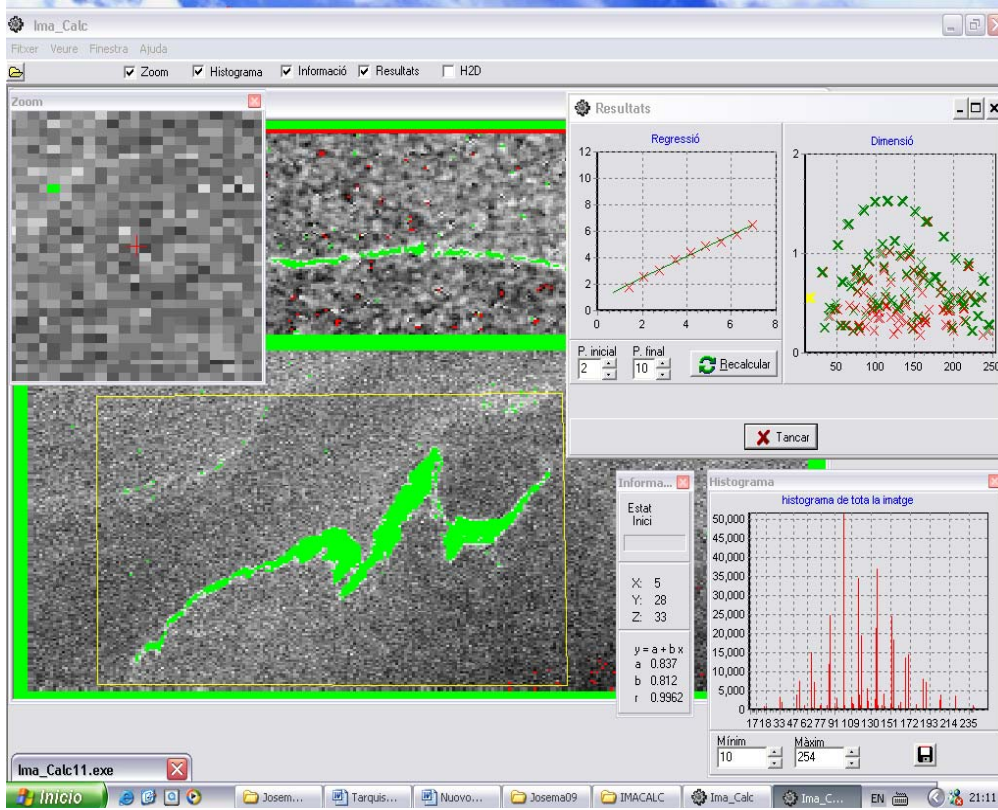
$$E_l \approx v_l^2 \left(\frac{l}{l_0} \right)^{3-D} \quad (\text{Ec. A-84})$$

El flujo de energía Π'_l desde escalas l , a pequeñas escalas es E_l/t_l . Así,

$$\Pi'_l \approx \frac{v_l^3}{l} \left(\frac{l}{l_0} \right)^{3-D} \quad (\text{Ec. A-85})$$

Asumimos usualmente que para altos números de Reynolds, hay un rango inercial en el que el flujo de energía es independiente de l :

$$\Pi_l' \approx \varepsilon \approx \frac{v_0^3}{l_0} \quad (\text{Ec. A-86})$$



Descripción de un análisis multifractal de un vórtice con ImaCalc

Una consecuencia de la expresión anterior, cuando $l \rightarrow l_0$, y v_0 es la velocidad característica a la escala l_0 , es la siguiente:

$$v_l \approx v_0 \left(\frac{l}{l_0} \right)^{\frac{1}{3} \frac{3-D}{3}} \quad (\text{Ec. A-87})$$

$$t_l \approx \frac{l}{v_l} \approx \frac{l_0}{v_0} \left(\frac{l}{l_0} \right)^{\frac{2}{3} + \frac{3-D}{3}} \quad (\text{Ec. A-88})$$

La ecuación anterior puede ser vista como la afirmación que el campo de velocidad tiene el exponente escalar

$$H = \frac{1}{3} - \frac{3-D}{3} \quad (\text{Ec. A-89})$$

En la serie ζ de dimensión fractal D , en la cual la cascada se acumula. Esta nueva formulación será útil para la generalización a multifractales.

Pasamos ahora a las funciones de la estructura. A nivel fenomenológico, es difícil distinguir entre las funciones de la estructura longitudinal y los relacionados con otros

componentes. Estando aquí, debemos evitar tales distinciones y simplemente indicar la función de la estructura de orden p de $\langle \delta v_p^l \rangle$.

Hay dos contribuciones a esta cantidad, un factor v_p^l , procedente de los remolinos activos y un factor de intermitencia

$$p_l = (l/l_0)^{3-D}$$

ocupado por los remolinos activos de escala l . Utilizando la expresión anterior, obtenemos:

$$S_p(l) = \langle \delta v_l^p \rangle \approx v_0^p \left(\frac{l}{l_0} \right)^{\zeta_p} \quad (\text{Ec. A-90})$$

Con

$$\zeta_p = \frac{p}{3} + (3-D)\left(1 - \frac{p}{3}\right) \quad (\text{Ec. A-91})$$

Se ve que para el modelo β , el exponente ζ_p es una función lineal y constante de orden p . Hay que tener en cuenta que para $p = 6$ la diferencia de valor de la teoría K41 es igual a la codimensión 3-D.

Para $p=2$, encontramos que el segundo orden de la función de la estructura tiene el exponente $2/3+(3-D)/3$; por lo tanto, el espectro de energía en el rango inercial, satisface:

$$E(k) \propto k^{-\left(\frac{5+3-D}{3}\right)} \quad (\text{Ec. A-92})$$

Que es más abrupta que la del espectro de Kolmogorov-Obukhov $k^{-5/3}$. Para $p=3$, obtenemos $\zeta_3=1$, como requerimiento de la ley cuatro quintos de Kolmogorov.

El punto de corte viscoso para el modelo β se obtiene igualando el tiempo de rotación de Foucault t_i y la difusión viscosa. Esto da la siguiente escala de disipación

$$\eta \approx l_0 R^{-\frac{3}{1+D}} \approx l_0 R^{-\frac{1}{1+H}} \quad (\text{Ec. A-93})$$

Desde el punto de vista multifractal, procedemos a derivar la expresión para la función de estructura de orden p .

$$\frac{S_p(l)}{v_0^p} \equiv \frac{\langle \delta v_l^p \rangle}{v_0^p} \approx \int d\mu(H) \left(\frac{l}{l_0} \right)^{ph+3-D(H)} \quad (\text{Ec. A-85})$$

Aquí, la medida $d\mu(H)$ nos da el peso de los diferentes exponentes. El factor $(l/l_0)^{pH}$ es la contribución de la expresión anterior y el factor $(l/l_0)^{3-D(H)}$ es la probabilidad de estar dentro de una distancia l , de la serie ζ_h de dimensión $D(H)$.

Los pesos $d\mu(H)$ han desaparecido de las expresiones asintóticas de las funciones de la estructura. Más libremente, si ignoramos las correcciones logarítmicas, podemos escribir:

$$\frac{S_p(l)}{v_0^p} \approx \left(\frac{l}{l_0}\right)^{\zeta_p}, l \rightarrow 0. \quad (\text{Ec. A-94})$$

Para la ley 4/5 de Kolmogorov, el exponente para la función de estructura de tercer orden debe de ser la unidad.

$$\zeta_3 = \inf_H [3H + 3 - D(H)] = 1 \quad (\text{Ec. A-95})$$

En relaciones anteriores entre la dimensión $D(H)$ y el exponente de función de estructura ζ_p reconocemos la transformada de Legendre. La cantidad ζ_p es la máxima distancia vertical registrada entre el gráfico del espectro multifractal $D(H)$ y la línea que atraviesa el origen de pendiente p . Si $D(H)$ tiene derivadas no crecientes, es decir, es cóncava, entonces para un valor dado de p , el máximo se alcanza en el único valor $H_*(p)$ tal que:

$$D'(H(p)) = p \quad (\text{Ec. A-96})$$

Y ζ_p es dado por

$$\zeta_p = pH(p) + 3 - D(H(p)). \quad (\text{Ec. A-97})$$

Si la invertimos, obtenemos:

$$D(H) = \inf_p (pH + 3 - \zeta_p). \quad (\text{Ec. A-98})$$

A partir de las expresiones anteriores, obtenemos:

$$\frac{d\zeta_p}{dp} = H(p) + [p - D'(H(p))] \frac{dH(p)}{dp} = H(p) \quad (\text{Ec. A-99})$$

Hay que tener en cuenta que, incluso si $D(H)$ no es cóncava, la transformación de Legendre ζ_p definida por las expresiones anteriores puede ser cóncava. La inversión de la fórmula anterior, puede en principio ser usada para extraer la función $D(H)$ a partir de datos experimentales o numéricos sobre los exponentes ζ_p . En la práctica no es un buen condicionante para la operación de datos porque la pendiente de la gráfica no está bien determinada, a excepción de pequeños valores de p en el que está muy cerca de 1/3 con $D(h)$ muy cerca a 3; que son por supuesto los valores de K41 tal como demuestra Frish 1995.

**CARACTERIZACIÓN DE
LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES
EN LA ZONA COSTERA**

TESIS DOCTORAL DE:

MARGARITA DÍEZ RILOVA

DIRIGIDA POR:

**JOSE MANUEL REDONDO
Y
JOAN PAU SIERRA**

**EN EL PROGRAMA DE
CIENCIAS DEL MAR
DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA**

BARCELONA, NOVIEMBRE 2011

RESUMEN

En nuestra sociedad los derivados del petróleo son la fuente principal de energía. Los accidentes con hidrocarburos han protagonizado episodios de contaminación trágicos para la biosfera del océano. En este capítulo se analizan algunos de ellos, sus efectos y sistemas de limpieza. Asimismo se describen las ecuaciones que rigen la turbulencia y los procesos de dispersión costera.

La complejidad de los procesos físicos, químicos o biológicos que actúan sobre el crudo en el mar, hacen difícil su estudio en laboratorio. Visto el problema y la necesidad de tomar decisiones urgentes e inteligentes se han hecho numerosas campañas de campo para estudiar estos procesos.

El tratamiento digital de imágenes de vídeo permite numerosas aplicaciones en el campo de la hidromorfodinámica, pues es posible controlar la evolución espacial y temporal de cualquier parámetro con evidencias visibles. Las imágenes sufren numerosas alteraciones, deformaciones, ruidos, etc., que hay que depurar con filtros y transformaciones adecuadas previamente al análisis cuantitativo. Parte del trabajo consiste en desarrollar la metodología para llevar a cabo alguna de estas aplicaciones en el estudio de la difusión turbulenta en el océano.

Para este estudio se han realizado distintas campañas de campo en zonas de hidrodinámica con escalas y procesos físicos predominantes diferentes: zonas costeras (Delta del Ebro y playa de Vilanova); en aguas confinadas (puerto de Barcelona y puerto de Recife); y en aguas abiertas (Mediterráneo Occidental). En los mismos se han empleado diferentes tecnologías (foto, vídeo, satélite). En los experimentos se midieron los agentes forzadores: viento, oleaje, marea, etc. y se correlacionaron para caracterizar los diferentes escenarios. También se ha revisado el estado del arte de otras campañas de campo y del tratamiento digital de imágenes a distintas escalas.

El análisis de las imágenes y datos de los experimentos han consistido en caracterizar la difusión a la pequeña escala de trazadores puntuales o lagrangianos (flotadores) y trazadores continuos o agentes dispersivos (manchas de leche y fluoresceína) en la superficie del agua y examinar la influencia de los agentes forzadores: viento, oleaje, corrientes internas, marea, temperatura, morfología, topología del flujo, etc., con el objetivo de encontrar las dependencias funcionales del coeficiente de difusión medido en cada ámbito. El estudio hidrodinámico se ha realizado a tres escalas básicas dentro de la autosimilitud de los procesos turbulentos: turbulencia, oleaje y corrientes.

Se presenta una descripción metodológica de la adquisición de imágenes desde distintos medios, sobre los equipos, los tratamientos de imágenes y la cuantificación de los parámetros. Además se analizan las teorías sobre turbulencia, el efecto de la intermitencia, vorticidad, estratificación.

Los coeficientes de difusión presentan una gran variedad condicionada a la dependencia característica con la escala temporal y espacial de los fenómenos predominantes. En el caso de una distribución de la energía con un espectro espacial del tipo $E(k) \propto K^{-m}$ (Kolmogorov 1941, $m=5/3$ en flujo local en equilibrio) la difusión turbulenta depende de la escala espacial siguiendo la ley de Richardson (1922 y 1926) $K(l) \propto L^{4/3}$. Si consideramos que la turbulencia ambiental está caracterizada por una

escala (L =escala integral), se demuestra que la difusión será máxima cuando la mancha sea comparable a $\sigma=L$, difusión anómala. Los coeficientes de difusión medidos se agruparon según el número de Reynolds y se hizo una clasificación: hipodifusividad, hiperdifusividad y difusión anómala. Esta caracterización de escenarios permite parametrizar el medio para modelizar su comportamiento y poder predecir su evolución.

También se ha demostrado que la técnica del análisis digital de imágenes es una técnica no intrusiva que ofrece datos de oleaje de una zona, en contraposición a los datos puntuales de los sensores. Los espectros obtenidos han demostrado una gran fiabilidad. Las imágenes ofrecen información instantánea y información acumulada, que al ser tratadas, permiten obtener espectros de energía, detectar la morfología de barras sumergidas, identificar corrientes de retorno, caracterizar run-up, etc.

En el puerto de Barcelona se tomaron numerosos datos de velocidades de viento (V_v) y advección (V_c) llegando a una buena correlación entre ambas (V_{cx} (cm/s)= 2.306 V_{vx} (m/s)+ 0.148) y constatando que hay una influencia de otros efectos como la marea, reflexión de los muelles o difracción que no se pueden obviar.

Otro tipo de imágenes son las de satélite. Se analizan imágenes de Rádar de Apertura sintética SAR para detectar episodios de contaminación y analizar la vorticidad del medio. Del primer análisis de imágenes satélite resultó sorprendente el gran número de manchas detectadas. Se comprobó que los vertidos siguen la Ley de Zipp (distribución hiperbólica entre los accidentes y su tamaño).

Por otro lado, se analizó la vorticidad a gran escala y la estabilidad de los remolinos. Se vió que estos siguen los cañones submarinos. Con el análisis fractal del contorno de la mancha se puede caracterizar su origen (antropogénico o natural como masas de plankton) y su envejecimiento o persistencia, etc.

También es importante resaltar la complejidad de la interacción no-lineal de los distintos agentes que producen difusión en el mar. Se comprueba que es posible que la intermitencia de la turbulencia pueda parametrizarse mediante medidas fractales y que el uso de momentos de orden superior ayuda a comparar medidas de difusión a distintas escalas mediante la Ley de Richardson Generalizada. Así se relaciona la pendiente del espectro, la intermitencia y la dependencia temporal de la difusión efectiva.

Con todo ello, se pretende efectuar contribuciones puntuales que ayuden a comprender mejor los procesos de dispersión de los contaminantes en el mar y, por consiguiente, ayudar en la lucha contra este fenómeno.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, estoy agradecida a: Andrés Rodríguez, quien me introdujo en el tema despertando mi curiosidad;

Al Ministerio de Educación y Ciencia por la beca de Investigación y Desarrollo de Formación de Personal Univesitario, a la Universidad de Cambridge por la beca para el Summer School en dinámica de fluidos y a Ports de la Generalitat por la beca del Máster en Ingeniería y Explotación Portuaria.

Al Laboratorio de Ingeniería Marítima y al departamento de Física Aplicada por los proyectos europeos en los que se ha participado (FANS, Clean Seas) y a los convenios de colaboración con la ingeniería Alatec-Haskoning y la Autoridad Portuaria de Barcelona por su confianza y medios ofrecidos.

A Ports de la Generalitat por la experiencia práctica portuaria profesional como técnica en el puerto de Palamós, responsable en medioambiente, explotación y Responsable Territorial de la Zona Portuaria Centro.

A los tutores de la presente tesis, Joan Pau Sierra y José Manuel Redondo por su tiempo, dedicación y por todo cuanto con ellos me ha sido posible aprender; y por compartir el interés, facilitarme su metodología de estudio, los datos e imágenes y la profundización del estudio de la turbulencia, la difusión y la mezcla.

También quiero agradecer su colaboración a todos aquellos que han participado en la obtención de las imágenes y de las medidas de campo, quienes conocen "el valor de un dato" Eduardo Bahia, Cesar Mosso, Maria Ozilea Bezerra, Roberto Castilla y Alexei Platonov.

Por último, y no por ello en menor grado, estoy agradecida a mis padres por facilitarme las cosas y apoyarme de forma que haya podido llegar hasta aquí, y a Alberto por permitirme sacar tiempo distrayendo a mis amores, Nerea y Pau.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	1—9
1.1	JUSTIFICACIÓN	1—10
1.2	PLANTEAMIENTO	1—11
1.3	OBJETIVOS	1—13
1.3.1	<i>Objetivos Generales.....</i>	<i>1—14</i>
1.3.2	<i>Objetivos Particulares.....</i>	<i>1—14</i>
2	ANTECEDENTES	2—16
2.1	ESTUDIOS EN ZONAS COSTERAS CON IMÁGENES.....	2—17
2.1.1	<i>Técnicas de Observación.....</i>	<i>2—17</i>
2.1.2	<i>Fotografía Aérea.....</i>	<i>2—17</i>
2.1.3	<i>Fotografía terrestre.....</i>	<i>2—17</i>
2.1.4	<i>Fotografía Estereoscópica.....</i>	<i>2—18</i>
2.1.5	<i>Imágenes Promediadas.....</i>	<i>2—18</i>
2.1.6	<i>Vídeo.....</i>	<i>2—18</i>
2.1.7	<i>Imágenes de Satélite.....</i>	<i>2—20</i>
2.2	EXPERIMENTOS EN MAR ABIERTO Y EN LA COSTA	2—20
2.3	RESUMEN DE ALGUNOS EXPERIMENTOS DE CAMPO CON IMÁGENES 2—23	
2.3.1	<i>Delta 93.....</i>	<i>2—23</i>
2.3.2	<i>Vilanova y Recife.....</i>	<i>2—24</i>
2.3.3	<i>Sistema ARGUS.....</i>	<i>2—26</i>
2.3.4	<i>Seguimiento de dragados en canales de navegación.....</i>	<i>2—33</i>
2.3.5	<i>Medida de la pendiente del agua en la zona de rotura.....</i>	<i>2—34</i>
2.4	ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA DIFUSIÓN TURBULENTA.....	2—36
3	CONTAMINACIÓN MARINA POR HIDROCARBUROS	3—41
3.1	ANTECEDENTES DE FUENTES DE VERTIDOS.....	3—42
3.2	PROPIEDADES DE LOS HIDROCARBUROS.....	3—45
3.3	EFFECTOS EN LOS ECOSISTEMAS MARINOS	3—48
3.3.1	<i>Aves.....</i>	<i>3—50</i>
3.3.2	<i>Mamíferos.....</i>	<i>3—50</i>
3.3.3	<i>Peces.....</i>	<i>3—50</i>
3.3.4	<i>Organismos superficiales.....</i>	<i>3—51</i>
3.3.5	<i>Organismos intermareales.....</i>	<i>3—51</i>
3.3.6	<i>Organismos del lecho marino.....</i>	<i>3—52</i>
3.3.7	<i>Marismas.....</i>	<i>3—53</i>
3.3.8	<i>Regiones polares.....</i>	<i>3—54</i>
3.3.9	<i>Arrecifes de coral.....</i>	<i>3—54</i>
3.4	PREVENCIÓN DE VERTIDOS.....	3—54
3.4.1	<i>Construcción de los barcos petroleros.....</i>	<i>3—56</i>
3.4.2	<i>Métodos operativos en los buques.....</i>	<i>3—57</i>
3.4.3	<i>Seguridad en la Navegación.....</i>	<i>3—57</i>
3.5	CONTROL DE VERTIDOS.....	3—58
3.5.1	<i>Control por sensores ópticos.....</i>	<i>3—58</i>
3.5.2	<i>Control por radar.....</i>	<i>3—59</i>
3.6	TÉCNICAS DE ELIMINACIÓN	3—59
3.6.1	<i>Limitación de la Mancha.....</i>	<i>3—59</i>
3.6.2	<i>Bombeo.....</i>	<i>3—60</i>
3.6.3	<i>Absorción.....</i>	<i>3—60</i>

3.6.4	<i>Biodegradación acelerada</i>	3—61
3.6.5	<i>Adsorción</i>	3—62
3.6.6	<i>Precipitación</i>	3—63
3.6.7	<i>Combustión</i>	3—63
3.7	EFFECTOS DE LAS TÉCNICAS DE LIMPIEZA	3—63
3.8	TIPOS DE VERTIDOS.....	3—64
3.8.1	<i>Vertido puntual</i>	3—64
3.8.2	<i>Contaminación crónica</i>	3—65
3.8.3	<i>Contaminantes persistentes</i>	3—67
4	DISPERSIÓN COSTERA Y TURBULENCIA	4—68
4.1	CONCEPTOS BÁSICOS.....	4—69
4.1.1	<i>Flujo viscoso</i>	4—69
4.1.2	<i>Conservación de masa</i>	4—69
4.1.3	<i>Ecuaciones de Navier-Stokes</i>	4—69
4.1.4	<i>Vorticidad</i>	4—70
4.1.5	<i>Flujo turbulento</i>	4—70
4.1.6	<i>Número de Reynolds</i>	4—71
4.1.7	<i>Ecuaciones de Reynolds</i>	4—71
4.1.8	<i>Difusión molecular. Ley de Fick</i>	4—72
4.1.9	<i>Difusión turbulenta</i>	4—72
4.1.10	<i>Mecanismos de dispersión</i>	4—73
4.1.11	<i>Dispersión horizontal</i>	4—74
4.1.12	<i>Agentes actuantes</i>	4—75
4.2	ESCALAS ESPACIALES Y TEMPORALES	4—77
4.3	TEORÍAS SOBRE LA TURBULENCIA.....	4—78
4.3.1	<i>Teoría de Kolmogorov y el Espectro Turbulento</i>	4—78
4.3.2	<i>Teoría de Boussinesq</i>	4—82
4.3.3	<i>Teoría de Prandtl para la Longitud de Mezcla</i>	4—83
4.3.4	<i>Teoría del Transporte de Vorticidad de Taylor</i> ,.....	4—84
4.3.5	<i>Hipótesis de Similitud de Von Kármán</i>	4—85
4.4	CLASIFICACIÓN DE LA TURBULENCIA.....	4—86
4.4.1	<i>Clasificación por escalas</i>	4—86
4.4.2	<i>Difusión molecular</i>	4—87
4.4.3	<i>Subrango inercial</i>	4—87
4.4.4	<i>Difusividad lineal</i>	4—88
4.4.5	<i>Difusión anómala</i>	4—89
5	ANÁLISIS DIGITAL DE IMÁGENES	5—91
5.1	CAPTACIÓN DE LAS IMÁGENES	5—92
5.2	CÁLCULO DIRECTO DEL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN TURBULENTA...5—	94
5.3	SOFTWARE DE TRATAMIENTO AVANZADO DE IMAGENES	5—98
5.3.1	<i>DigiImage</i>	5—98
5.3.2	<i>“TICE”</i>	5—101
5.3.3	<i>Kd</i>	5—103
5.3.4	<i>DigiFlow</i>	5—104
5.4	POSTPROCESO DIGITAL.....	5—105
5.4.1	<i>Tratamiento previo de las cintas</i>	5—105
5.4.2	<i>Transformación de coordenadas</i>	5—106
5.4.3	<i>Selección de las imágenes a analizar</i>	5—111
5.4.4	<i>Correcciones para eliminar efectos no deseados</i>	5—113
5.5	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LAS IMÁGENES	5—115
5.5.1	<i>Coordenadas de puntos</i>	5—115

5.5.2	<i>Interpretación gráfica</i>	5—117
5.5.3	<i>Series temporales</i>	5—117
5.5.4	<i>Promediado temporal</i>	5—118
5.5.5	<i>Estadísticos</i>	5—119
5.5.6	<i>Análisis espectral</i>	5—120
5.5.7	<i>Análisis fractal</i>	5—121
6	EXPERIMENTOS	6—123
6.1	INTRODUCCIÓN	6—124
6.2	METODOLOGÍA DE LOS EXPERIMENTOS	6—124
6.3	CAMPAÑAS DE CAMPO	6—127
6.3.1	<i>Campaña Delta 93</i>	6—127
6.3.2	<i>Campaña Delta 96</i>	6—129
6.3.3	<i>Desembocadura del Ebro</i>	6—135
6.3.4	<i>Puerto de Barcelona</i>	6—136
6.4	IMÁGENES POR SATÉLITE SAR.....	6—144
7	RESULTADOS	7—146
7.1	COEFICIENTES DE DISPERSIÓN	7—147
7.1.1	<i>Resultados de Delta 93</i>	7—147
7.1.2	<i>Resultados de Delta 96</i>	7—149
7.1.3	<i>Resultados de Recife (Brasil)</i>	7—151
7.1.4	<i>Resultados de Vilanova i la Geltrú</i>	7—153
7.1.5	<i>Resultados del puerto de Barcelona</i>	7—154
7.2	DIFUSIÓN A GRAN ESCALA.....	7—159
7.2.1	<i>Identificación de manchas y advección</i>	7—160
7.2.2	<i>Contaminación marina</i>	7—163
7.2.3	<i>Resultados de Vorticidad</i>	7—164
7.3	EVOLUCIÓN DEL OLEAJE EN ZONA DE ROMPIENTES.....	7—166
7.3.1	<i>Sensor de presión de altura de ola</i>	7—166
7.3.2	<i>Sensor de nivel</i>	7—168
7.3.3	<i>Análisis de imágenes</i>	7—169
7.4	IDENTIFICACIÓN DE CORRIENTES.....	7—170
7.5	OTRAS CARACTERIZACIONES MORFOLÓGICAS.....	7—174
7.6	MODELADO NUMÉRICO	7—176
8	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	8—184
8.1	EVALUACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE MEDIDA	8—185
8.1.1	<i>Sistemas de captación</i>	8—185
8.1.2	<i>Equipo</i>	8—186
8.1.3	<i>Mecanismos de elevación</i>	8—186
8.1.4	<i>Metodología de las campañas de campo</i>	8—190
8.2	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE DISPERSIÓN	8—191
8.2.1	<i>Zona de rompientes</i>	8—191
8.2.2	<i>Turbulencia y dispersión</i>	8—192
8.2.3	<i>Análisis de los resultados de dispersión en el puerto de Barcelona</i>	8—194
8.2.4	<i>Efecto del viento en la dispersión</i>	8—200
8.2.5	<i>El efecto de la marea</i>	8—203
8.3	ESPECTROS DE ENERGÍA	8—205
8.4	CIRCULACIÓN INDUCIDA POR VARIACIONES DE BATIMETRÍA	8—207
8.5	DETECCIÓN DE CONTAMINACIÓN	8—211
8.6	CARACTERIZACIÓN DE LA VORTICIDAD EN EL MEDITERRANEO NOROCCIDENTAL	8—215

8.7	DEPENDENCIA DE LA INTERMITENCIA Y FRACTALIDAD: LEY DE RICHARDSON GENERALIZADA.....	8—218
9	CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....	9—225
9.1	PRINCIPALES CONCLUSIONES.....	9—226
9.2	TRABAJO FUTURO:.....	9—230
10	BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....	10—232
ANNEXO 1: TEORÍA DE LA TURBULENCIA.....		1
A.1	INTRODUCCIÓN A LA TURBULENCIA.....	2
A.2	DESCRIPCIÓN INTEGRAL A DISTINTAS ESCALAS.....	3
A.3	CASCADA DE ENERGÍA Y INTERMITENCIA.....	6
A.3.1	<i>Cascada de energía.....</i>	6
A.3.2	<i>Disipación viscosa.....</i>	7
A.3.3	<i>Rango inercial.....</i>	7
A.3.4	<i>Efecto del empuje (b).....</i>	8
A.3.5	<i>Definición de intermitencia.....</i>	10
A.3.6	<i>Funciones de estructura.....</i>	10
A.4	ANÁLISIS FRACTAL Y MULTIFRACTAL.....	12
A.4.1	<i>Definición de dimensión fractal.....</i>	12
A.4.2	<i>Análisis multifractal.....</i>	12
A.4.3	<i>El método BOX-COUNTING.....</i>	13
A.4.4	<i>Función de densidad espectral.....</i>	14
A.4.5	<i>Aplicación de análisis MultiFractal a contornos.....</i>	16
A.5	EFFECTOS DE ESCALA.....	17
A.5.1	<i>Análisis dimensional.....</i>	17
A.5.2	<i>Simplificaciones dimensionales de Navier-Stockes.....</i>	19
A.5.3	<i>Interpretación física.....</i>	20
A.5.4	<i>Aplicación de análisis multifractal.....</i>	21

Annexo 2 Díez M, Bezerra MO, Mosso C, Castilla R y Redondo JM (2009) "Experimental measurements and diffusion in harbour and coastal zones." Il Nuovo Cimento della Società Italiana di Fisica C. Geophysics and space physics", Vol. 31 C, N. 5-6 DOI 10.1393/ncc/i2009 -10354-3 p. 843-859

Annexo 3 Tarquis AM, Platonov A, Matulka A, Grau J, Sekula E, Díez M y Redondo JM (2011) "Application of multifractal analysis to the study of SAR features and oil spills in the ocean surface." Non-Linear Processes in Geophysics 2011, npg-2010-123.

1 INTRODUCCIÓN

Como preámbulo se empieza justificando el estudio, se explica cómo se ha planteado y los objetivos que se han intentado alcanzar. También figura en este capítulo una breve descripción del contenido de este trabajo.

1.1 JUSTIFICACIÓN

La mejor manera de combatir la contaminación es la prevención, pero no siempre es posible.

El primer gran accidente de un petrolero referenciado en la bibliografía fue el Torrey Canyon, el 18 de marzo de 1967, con 119.000 toneladas de petróleo, afectando 150 km de costa de Cabo Cornualles. En 1978 se vertieron, en doce días, 223.000 toneladas de petróleo ligero y 4.000 toneladas de fuel pesado del Amoco Cádiz cerca de Cabo Finisterre. La agitación del oleaje produjo que las fracciones ligeras, de baja viscosidad, se emulsionaran dando una gran "mousse de chocolate". En 1991, Irak realizó un vertido deliberado en el noroeste del Golfo Árabe, vertiendo entre 500.000 y un millón de toneladas de petróleo bruto de Kuwait. En 1992, el Mar Egeo embarrancó a la entrada de la Ría de la Coruña con casi 80.000 toneladas de crudo, se rompió y explotó, liberando casi la totalidad de su carga, que afectó a unos 200 Km de costa. En el 2002, el temporal de mar y viento rompieron el Prestige y dispersaron el crudo por todo el Cantábrico, llegando hasta Francia. La dificultad de confinación y recogida del famoso chapapote por su alta viscosidad suelen convertir las playas en dramas ecológicos. En 2010 la rotura de un oleoducto de BP en el Golfo de México vertió 4,9 millones de barriles. Los trabajos de limpieza costaron más de 6.100 millones de dólares.

A pesar de la gran difusión que dan los medios de comunicación a los vertidos accidentales de crudo, la contaminación marina debida a estos vertidos se cuantifica aproximadamente en un 25% de la contaminación total por hidrocarburos que llega a esta agua. Otro 25% se debe a vertidos rutinarios por limpieza de tanques y aguas de lastre y de sentinas. Pero lo más sorprendente es que el 50% tiene origen terrestre, a través de la contaminación de ríos y del lavado de pavimentos (Redondo y Platonov 2009).

El fenómeno de dispersión es uno de los procesos más importantes en el océano, pues además del efecto de la contaminación también influye en las características físico-químicas y, consecuentemente, en las biológicas del agua marina. Ésta se refleja en la distribución y transporte de las sustancias disueltas, esenciales para la vida marina tales como sales minerales, CO₂, oxígeno, materia orgánica, nutrientes etc., así como en la transferencia de calor. El equilibrio de los mares depende de estos movimientos que alimentan este complejo ecosistema.

La limitación básica de los experimentos de laboratorio es que no resulta fácil extrapolar sus resultados a respuestas en el medio natural. Es particularmente difícil para el caso de hidrocarburos, pues sus propiedades físicas no se pueden simular adecuadamente y en la zona costera intervienen multitud de procesos, difíciles de simular. Los procesos de dispersión en el océano tienen una gran complejidad, pues se suman efectos a diferentes escalas. Los experimentos tratan de aislar estos efectos para caracterizarlos y modelarlos numéricamente.

La turbulencia puede ser idealizada como una variedad de diferentes tamaños de remolinos. Estos remolinos se comportan de diversas formas en función de las escalas a las cuales hay un aporte de energía y donde ésta se disipa. El espectro turbulento representa la magnitud de la contribución de cada longitud de onda (k) o frecuencia de los remolinos superpuestos a la energía cinética ($E(k)$) turbulenta total (Stull, 1950). En los procesos atmosféricos, por ejemplo, mientras los mayores remolinos 3D tienen de

100 a 3.000 m de diámetro, los pequeños están en el orden de pocos milímetros de diámetro.

1.2 PLANTEAMIENTO

Inicialmente, este trabajo se planteó como tesina de especialidad (Díez, 1998) para la titulación de Ingeniería de Caminos Canales y Puertos, participando en las campañas de campo de Delta'96 para obtener los coeficientes de dispersión turbulenta de las manchas vertidas (Díez, 1998) y confirmar la aplicabilidad de la metodología y las conclusiones obtenidas a partir de unos pocos casos analizados en Delta'93 por Rodríguez (1997) y Bahía (1997).

Las imágenes de vídeo ofrecieron información sobre el medio no detectada inicialmente, como por ejemplo una corriente de retorno, y permitieron caracterizar los coeficientes de difusión. Al ser campañas de campo muy completas se pudo disponer de información de los agentes forzadores y de los distintos procesos que se estaban desarrollando.

Se profundizó en la caracterización hidrodinámica de oleaje de los tests, desarrollando nuevas aplicaciones digitales de imágenes para obtener parámetros del oleaje como dirección incidente, altura de ola y frecuencia, caracterizar la zona de rotura con el run-up y set-up. También se pueden obtener espectros de energía, comparar los datos obtenidos con imágenes y con los espectros obtenidos de los sensores y correntímetros.

Vistas las grandes posibilidades de la técnica de análisis digital de imágenes para el estudio de la difusión lagrangiana en el océano y la necesidad de este tipo de estudios aplicado a las zonas costeras, playas confinadas y puertos, se decidió usar dicha técnica para comprender mejor los procesos de difusión cuando existe una múltiple interacción de escalas y de agentes forzadores y para poder caracterizar de forma predictiva los factores que intervienen en la difusión.

Se participó activamente en la logística, preparación y desarrollo de los experimentos de campo, así como en el postproceso e inventariado de los tests.

En la Universidad de Delft desarrollaron paralelamente esta técnica, comercializando sus aplicaciones mediante el sistema Argus, actualmente implantado como sistema de seguimiento en diferentes lugares de todo el mundo, también en España.

La consultoría Alatec-Haskoning y la Autoridad Portuaria de Barcelona se mostraron interesadas en este estudio para caracterizar la hidrodinámica interior del puerto y validar los parámetros empleados en los modelos numéricos de predicción de dispersión de contaminantes. Las campañas realizadas en el interior del puerto son un escenario representativo de aguas someras e intermedias sin rotura, con una mayor influencia de viento y corrientes que del oleaje y con la interacción entre masas de aguas de diferente temperatura y salinidad, como aguas interiores, exteriores y la pluma del delta del Llobregat, en diferentes condiciones meteorológicas características.

Paralelamente, se colaboró junto con Maria Ozilea Bezerra en el análisis de las campañas de Vilanova, una zona costera confinada por dos espigones que se

caracterizaba por el oleaje y las corrientes inducidas por las condiciones de contorno (Bezerra 2000 y Bezerra et al. 1995, 1998 y 1999).

Posteriormente se trabajó con el análisis de imágenes de satélite tipo SAR, para estudiar la turbulencia característica a gran escala y analizar la contaminación del Mediterráneo Occidental (Redondo et al., 2009).

La gran cantidad de datos experimentales a escalas y ambientes diferentes permiten poder aplicar la teoría de la turbulencia en zonas costeras y analizar su variabilidad. Sin embargo las escalas de turbulencia se pueden extender por ambos extremos tanto temporalmente como espacialmente. Se estudian los conceptos de intermitencia y no-dependencia al aplicar las teorías más clásicas de la turbulencia en el mar.

Este trabajo se centra en la escala de los efectos que se pueden observar o percibir. Para su análisis se ayuda de trazadores naturales o vertidos y de herramientas digitales. Se puede decir que se trata de un trabajo basado en la observación y en experimentos de campo.

La ayuda de imágenes de satélite, gracias al proyecto europeo Clean Seas, permitió ampliar el estudio a mayores escalas (Jolly et al., 2000). En estos casos, las trazas de contaminación o plancton resultaron trazadores que permitieron estudiar la vorticidad, intermitencia y filamentación a gran escala. El análisis fractal resultó ser una técnica efectiva para discriminar entre contaminación y otros flotantes, haciendo un análisis del contorno de las manchas de crudo u otros tensioactivos.

Así que la estructura de la tesis sigue el desarrollo del trabajo, organizado del siguiente modo:

- Capítulo 1. Introducción, planteamiento y objetivos.
- Capítulo 2. Se empieza con una revisión de los antecedentes y del estado del arte. Se resumen experimentos de campo previos, el desarrollo de los tratamientos de imagen y la evolución de la teoría de la turbulencia.
- Capítulo 3. Se hace un análisis de la contaminación por hidrocarburos, los principales accidentes y fuentes de contaminación, sus efectos, sistemas de limpieza y prevención.
- Capítulo 4. Se resumen los principales conceptos de la teoría de dispersión costera y el efecto de la turbulencia.
- Capítulo 5. Se explica el tratamiento digital de imágenes, sus funciones y principales aplicaciones hidrodinámicas. Se indican las posibilidades del programa DigImage, en particular, cuyas funciones básicas se pueden desarrollar con otros programas.
- Capítulo 6. Se describen los experimentos realizados y la metodología empleada. Los del Delta del Ebro (Delta'96) con un gran despliegue instrumental de medidas simultáneas; los del puerto de Barcelona centrados en la dispersión y efecto del viento; las imágenes satélite de Radar de apertura Sintética.

- Capítulo 7. Se recogen los resultados de las campañas de campo y de las imágenes de satélite. Se presentan los coeficientes de dispersión obtenidos en función de distintos agentes forzadores, espectros de energía, parámetros de caracterización del oleaje y zona de swash, medidas de corrientes y, a gran escala, análisis fractal de medidas de contaminación y vorticidad.
- Capítulo 8. Se analizan los resultados y se comparan con los agentes forzadores. Se discuten los resultados según las teorías anteriormente analizadas.
- Capítulo 9. Se resumen las conclusiones a las que se llega, comparándolos con los objetivos y se plantean las líneas de trabajo futuro.
- Capítulo 10. Se enumera la bibliografía .

Se presentan además algunos anexos teóricos y trabajos publicados con la colaboración de otros científicos.

Anexo 1 Teoría de la turbulencia.

Anexo 2 Díez M, Bezerra MO, Mosso C, Castilla R y Redondo JM (2009) "Experimental measurements and diffusion in harbour and coastal zones." *Il Nuovo Cimento della Società Italiana di Fisica C. Geophysics and space physics*, Vol. 31 C, N. 5-6 DOI 10.1393/ncc/i2009 -10354-3 p. 843-859

Anexo 3 Tarquis AM, Platonov A, Matulka A, Grau J, Sekula E, Díez M y Redondo JM (2011) "Application of multifractal analysis to the study of SAR features and oil spills in the ocean surface." *Non-Linear Processes in Geophysics 2011*, npg-2010-123

1.3 OBJETIVOS

El objetivo principal de esta tesis, tal y como dice su título, es la caracterización experimental de los procesos de advección y difusión, en diferentes ámbitos de aguas costeras, dado que se trata de procesos de gran importancia en distintas ramas de la ciencia y la ingeniería, porque son los que controlan la dispersión de diversas sustancias (sedimentos, contaminantes, nutrientes, etc.) en los ambientes acuáticos.

A pesar de que teóricamente el estado del arte a nivel de turbulencia esté bien desarrollado, a efectos prácticos la gran variabilidad y dependencia de los agentes forzadores en la hidrodinámica costera hacen que sea necesario una caracterización experimental para ver la relevancia de estos agentes y su efecto en la dispersión. Para ello se parte de un análisis del estado del arte en teoría de la turbulencia y se pretende verificar para los casos de estudio en esta tesis. El nivel de detalle de las medidas, así como de la metodología, es más avanzado que en trabajos anteriores, ya que se consideran efectos como la intermitencia en la difusión turbulenta.

Por otro lado, se intenta buscar nuevas aplicaciones del análisis digital de imágenes en el campo de la ingeniería marítima para caracterizar parámetros hidrodinámicos y procesos de dispersión horizontal anisotrópica.

Finalmente, se analiza la contaminación por hidrocarburos, sus causas, efectos y sistemas de limpieza.

1.3.1 Objetivos Generales

Una parte muy importante de esta tesis es la obtención de medidas de campo para distintas escalas y el desarrollo de metodologías de trabajo diferentes, para cada ámbito y para la determinación de cada parámetro, que pueden ser útiles para posteriores investigaciones.

La aportación experimental al estado del arte de datos contrastados son un fin en sí mismo, ya que la dificultad de su obtención hace que sean escasos y de gran valor, así como la metodología empleada.

Por último, se cotejarán estadísticamente los diferentes agentes forzadores, para intentar establecer dependencias funcionales y explicar los fenómenos estudiados de forma estadística.

1.3.2 Objetivos Particulares

METODOLÓGICOS

- Validación y calibrado de la restitución de verdadera magnitud de imágenes de vídeo. Estimación de los errores.
- Aplicación del método de series temporales de una línea para la caracterización del oleaje. Comparación del análisis espectral de la energía por altura de ola a través de imágenes de vídeo y espectros de medidas de velocidad mediante correntímetros electromagnéticos.
- Identificación de corrientes de retorno en diferentes escenarios de la zona costera mediante análisis lagrangiano con el seguimiento de boyas lastradas.
- Caracterización de zonas de rotura y barras sumergida mediante promediado de imágenes.
- Evolución de la línea de orilla en zonas regresivas.
- Utilización de los resultados experimentales para parametrizar modelos numéricos.

CARACTERIZACIÓN DE LA TURBULENCIA

- Investigación de los procesos dominantes de difusión de contaminantes tanto en superficie como en profundidad afectados por las condiciones de contorno específicas del Puerto de Barcelona, así como de los parámetros ambientales relevantes tales como oleaje incidente, corrientes, viento, etc. mediante experimentos de campo. Éstos consisten en identificar, a través de la filmación en video, las trayectorias de boyas lastradas, así como de manchas trazadoras inocuas (Leche / Fluoresceína), que permitan caracterizar los coeficientes horizontales de difusión turbulenta en distintas áreas del puerto, así como su dependencia de las condiciones ambientales.
- Utilización de imágenes de Satélite, SAR, visible, infrarrojo, etc. para determinar de forma cuantitativa y estadística los incidentes de contaminación y la caracterización superficial del Mar Mediterráneo en las proximidades del Puerto de Barcelona y analizar su vorticidad.
- Estudio de los coeficientes de difusión a distintas escalas en referencia a las condiciones de contorno, estructura dinámica del océano y procesos de intermitencia.

AGENTES FORZADORES

- Cálculo de la relación de la difusión turbulenta a distintas escalas con el parámetro de velocidad de fricción del viento.
- Efecto del viento. Interacción entre la velocidad de fricción y la altura de oleaje.
- Calibrado de distintos métodos de medida de la velocidad en puertos para caracterizar el perfil vertical de velocidades y análisis de flujos.
- Comparación de medidas Eulerianas y Lagrangianas.
- Identificación de las corrientes en las dársenas del puerto. Generación de puntos de remanso. Caracterización de las líneas de corriente en puertos en distintas condiciones.
- Efecto de la altura y periodo del oleaje sobre la difusión en zonas confinadas y abiertas: Delta del Ebro, playa de Vilanova y la Geltrú, fuera y dentro del puerto de Barcelona.
- Efecto de la marea sobre masas confinadas como los puertos.

2 ANTECEDENTES

Se realiza un análisis del estado del arte en los diferentes aspectos tratados en esta tesis: teoría de la turbulencia y dispersión en el océano, el análisis digital de imágenes y los experimentos y toma de datos en la zona costera.

2.1 ESTUDIOS EN ZONAS COSTERAS CON IMÁGENES

En cuanto a los estudios en zonas costeras para la caracterización del procesos hidrodinámicos, a medida que las técnicas de análisis de imágenes se han desarrollado, se han aplicado a la hidrodinámica costera. Las técnicas de análisis digital de imágenes se han desarrollado gracias a las nuevas tecnologías de captación y procesado con mayor resolución espacial y temporal, desde los primeros trabajos con fotografías hasta los equipos de última generación de vídeo y estereofotogrametría y las imágenes de satélite. A continuación se describe la evolución de las campañas de campo con las distintas técnicas de tratamiento de imágenes.

2.1.1 Técnicas de Observación.

Richardson (1922) y después de sus estudios sobre difusión atmosférica con Stommel (1949), realizó experimentos observando la trayectoria de remolachas flotando para ver la difusión lagrangiana en el océano. Concluyó que los procesos de difusión dependen de gran número de factores que influyen en la distribución del contaminante. La mezcla en la región costera se origina por la combinación de la difusión turbulenta de pequeñas escalas y la variación de gran escala del flujo de velocidades medias. La escala de estudio determina las fuerzas básicas predominantes ($W=ML^2T^{-2}$).

Iribarren (1964), padre de la observación del oleaje al acercarse a la costa, formula su teoría del asomeramiento, publicada en la revista "Obras Marítimas" según la cual, al reducirse el fondo marino a profundidades menores a la mitad de su longitud de onda, disminuye su velocidad de propagación y la longitud de onda, aumentando su peralte. También analiza el fenómeno de la refracción, según el cual el oleaje al aproximarse a la costa tiende a una disposición paralela a las isobatas, variando la velocidad de propagación.

2.1.2 Fotografía Aérea.

Tras la 2ª guerra mundial algunos investigadores como Wiegel (1947) utilizaron la fotografía aérea para investigar sobre los patrones de rotura del oleaje y su interacción con la topografía. Pritchard (1956) las usó como constatación de la teoría sobre movimientos de remolinos y difusión de trazadores superficiales. Katz et al., (1965) utilizaron fotografías aéreas para ver la respuesta de la difusión de trazadores sobre las condiciones de la superficie del mar. Posteriormente Harris y Umbach (1972) analizan fotografías aéreas para analizar el modelo de circulación y Ozmidov (1990) para estudiar la dispersión de trazadores.

2.1.3 Fotografía terrestre.

- Sonu (1969 y 1973), es el primero en utilizar fotografía de 35 mm en sus medidas de corrientes costeras y procesos de mezcla. Después Harris et al. (1973) y Maresca y Seibel (1976) tomaron fotografías para obtener medidas de ondas en rotura y de corrientes longitudinales con boyas y fluoresceína.

- Bradshaw (1979) aplicó esta técnica para ver el comportamiento de la zona de “swash” en playas.
- Hull et al. (2002) analizaron la rotura del oleaje y las presiones de impacto en un dique vertical mediante fotografía con flash secuencial.

2.1.4 Fotografía Estereoscópica.

- Sasaki, Horikawa y Hotta (1976) emplearon los principios de la estereoscopia con imágenes tomadas con dos globos y cámaras de 70 mm para cuantificar el campo 3D del flujo en la zona de “surf”.
- Holman y Sallenger (1985) usaron secuencias temporales de fotografía para analizar series de oscilaciones en la zona de “swash”. Holland et al. (1995) también las emplearon para tomar mediciones de ondas “run-up” y Carlson (1985) en playas disipativas.
- Tsubaki y Fujita (2005) lo aplican en Japon, a olas de pequeña amplitud y para analizar cavitaciones por cambios del fondo en un canal, con una gran precisión. La desviación estándar de las medidas era de 0,015 cm, pero con escasa resolución temporal, 12 Hz.
- Hilsentein (2005) reconstruyó la superficie del oleaje con cámaras termográficas y visión estereoscópica.
- Wanek y Wu (2006) emplearon tres cámaras para resolver la reflexión especular que produce el agua para tomar medidas en un lago. La calibración con instrumental (wave gauge) ofreció diferencias inferiores a 1 mm para oleaje significativo de 20,82 cm.
- Benetazzo (2006) empleó un método que aplicaba un algoritmo a imágenes estereoscópicas de la superficie del oleaje.
- Iglesias et al. (2009) lo emplearon en un canal para analizar el comportamiento de manchas de aceite.

2.1.5 Imágenes Promediadas.

Las fotografías con largo tiempo de obturación resultan muy útiles para identificar características geométricas no visibles aparentemente. Con el desarrollo del vídeo, se obtiene la misma información haciendo un promediado de las imágenes. A continuación se citan algunos trabajos:

- Hotta et al (1980), aplicaron fotografía con largo tiempo de obturación, para analizar procesos en movimiento como el oleaje en zona costera.
- Wijnberg y Holman (1997) presentan características cíclicas de la rotura de barras
- Janssen (1997) analizó la variación del nivel intermareal de playa.
- Knaapen (1997) estimó batimetría a través del promediado de la rotura del oleaje.
- Díez (1998) estudió la rotura de barras y corrientes de retorno.
- Aarninkhof (2003) presenta su tesis basada en la cuantificación de la batimetría de barras costeras.

2.1.6 Vídeo.

Holman y Sallenger (1985) fueron los pioneros en grabar con vídeo los experimentos costeros. A partir de entonces, numerosos investigadores emplean imágenes de vídeo

para estudiar la hidrodinámica costera. A continuación se nombran algunos por orden cronológico:

- Hesselink (1988) presentó una descripción de la técnica de utilización de vídeo en flujos con procesamiento digital de imagen.
- Lee et al. (1989) determinaron velocidades y coeficientes de mezcla de trazadores.
- Lippman y Holman (1989) lo aplicaron para obtener una cuantificación de barras de arena basada en la disipación de la energía del oleaje.
- Aagaard y Holm (1989) estudiaron el “run-up”.
- Holland et al. (1991) caracterizaron la rotura y la calibraron de rebase.
- Lippman y Holman (1991) caracterizaron la rotura: aceleración y ángulo.
- Lippman y Holman (1992) analizaron la longitud y el periodo a una escala de tiempo asociada a la rotura del oleaje.
- Lippman, Holman y Hathaway (1993) estudiaron el comportamiento del flujo en sistemas de barras dobles.
- Walton (1993) hizo mediciones de ondas de “run-up”.
- Kuriyama y Ozaki (1993) presentaron la comparación entre datos de modelo numérico y datos de campo de corrientes longitudinales delimitadas por trazadores en la superficie del mar.
- Redondo et al. (1994) revisaron los procesos costeros: velocidades horizontales, mezcla, ángulo de rotura, periodo, “run up”, longitud de la zona de “surf”, morfología, etc.
- Medeiros et al. (1996) estudió la dispersión turbulenta en playas confinadas.
- Rodríguez (1997) continuó con el estudio de la hidrodinámica en Zona de Rompientes.
- Bahia (1997) hizo un estudio numérico experimental de la dispersión.
- Bueno et al. (1997) lo usaron para obtener las curvas de nivel de una batimetría de modelos reducidos de fondo móvil a medida que este se va llenando o vaciando de agua.
- Díez et al. (2001) estudiaron la dispersión en el puerto de Barcelona.
- Jensen et al. (2003) midieron el run-up de una playa con un oleaje oblicuo.
- García et al. (2003) emplearon el tratamiento por color para modelos a escala.
- Hequan et al. (2004) tomaron medidas de oleaje con refracción.
- Yao et al. (2004) presentaron una técnica de seguimiento secuencial de perfiles de oleaje basada en la adquisición automática de imágenes.
- Erikson et al. (2005) calibraron el sistema en un canal de oleaje.
- Osorio (2005) desarrolló la metodología de vídeo para el análisis costero, en 2006 realizó el seguimiento de dragados y en Osorio et al (2007) y Ortiz (2008) presentaron la caracterización de variables ambientales en zonas costeras.
- Holman y Stanley (2007) presentaron la historia y capacidades del sistema ARGUS como sistema comercial para la gestión costera.
- Jiménez et al. (2007) emplearon las imágenes para obtener indicadores para la planificación de la temporada de baño.
- Kroon et al. (2007) también presentaron un sistema de gestión costero basado en el tratamiento de imágenes.
- Medina et al. (2007) lo aplicaron a la gestión de la navegación de un canal.
- Salmon et al. (2007) lo usaron para medir el run-up de playa.
- Archetti (2008) monitoreo el oleaje de una playa, zona de swash.
- Ibañez et al (2007) y Iglesias et al. (2009) lo aplicaron en un canal de oleaje.
- Damiani y Mofetta (2008) monitorearon la playa en Alimini.

2.1.7 Imágenes de Satélite.

- Lichtenegger (1993) analizó vertidos de crudo en la costa gallega con imágenes SAR de la ERS1
- Martínez-Benjamin (1995) presentó estudios oceanográficos con sensores de microondas instalados en satélite.
- Marrasé et al. (1997) analizaron la turbulencia a través del plankton.
- Dalrymple, Kirby, Kennedy y Chen (1998) lo aplicaron para obtener batimetrías.
- Flores et al. (1998) estudiaron el comportamiento de vertidos de hidrocarburo en un tanque.
- Gade y Redondo (1999) analizaron la contaminación marina mediante imágenes de satélite del radar de apertura sintética SAR.
- Arnau (2000) estudió la variabilidad a mesoescala de la circulación en la plataforma continental catalana.
- Platonov (2001) analizó la contaminación marina y estudió la vorticidad.
- Dankert et al. (2003) se dedicaron a la detección de grupos de olas.
- Grau (2005) procesó secuencias de imágenes Meteosat.
- Platonov (2008) hizo un análisis multifractal de observaciones de remolinos, vertidos oleosos y trazas naturales en la superficie oceánica.
- Redondo et al. (2008) mediante análisis fractal estudió inestabilidades baroclínicas.
- Platonov et al. (2009) hicieron un análisis multifractal de observaciones de remolinos, vertidos oleosos y trazas naturales en la superficie oceánica.
- Matulka (2009) analizó el efecto de la estratificación y la rotación, destacando la relevancia del radio de deformación de Rossby como escala a la cual la estratificación y la rotación están en equilibrio.
- Pérez Marrero et al. (2009). Lo aplicaron para la predicción operacional de las trayectorias de objetos a la deriva en alta mar.
- Tarquis et al. (2011) usaron el análisis multifractal para caracterizar manchas de distinta vejez, relacionarlas con la difusión costera y a gran escala, así como estudiar la pluma de desembocaduras.
- Lee-Lueng et al. (2010) también analizaron la dinámica a mesoescala de los remolinos mediante altimetría de satélite con doble antena (SWOT). Establecieron una simulación de las observaciones a varias escalas validando la teoría de la cascada de energía.

2.2 EXPERIMENTOS EN MAR ABIERTO Y EN LA COSTA

Okubo y Ozmidov (1970) y Okubo (1971), compararon un gran número de experimentos de diferentes investigadores y concluyó que existe una dependencia de la escala espacial (ℓ) con el coeficiente de difusión (ley de los 4/3) siguiendo los razonamientos de Richardson (1922) y Kolmogorov (1941). El coeficiente de difusión no solo depende del fenómeno de escala (ℓ) (escala de los remolinos), sino también de otros factores, como por ejemplo de la escala del tiempo, de la velocidad de la corriente y de otros factores locales como el oleaje o el viento, además de la posible variación temporal y espacial del coeficiente.

Zeidler (1976), teniendo en cuenta los distintos procesos que generan energía a multiescala, concluyó que el comportamiento de la turbulencia costera, y por tanto la difusión, depende de por lo menos dos rangos diferentes, espaciados por bandas de input de energía: por un lado las ondas de viento (sea) y el mar de fondo ("swell"), que

tienen una escala de longitud característica del orden de unos 10-100 m; por otro lado, las mareas, que algunas veces se incluyen en el rango de oscilaciones inerciales cuya escala varía entre 1 Km – 10 Km. Además, existen otros tipos de fenómenos que pueden tener escalas menores que 1 Km, tales como las corrientes longitudinales o de retorno.

La difusión horizontal de trazadores en la superficie del océano es usualmente interpretada en términos de una difusión turbulenta. Otros factores también son atribuidos o están relacionados con el mismo efecto. En la mayoría de los estudios de difusión, se apunta a la escala del fenómeno (ℓ) como factor determinante que conduce a la difusión. A su vez, la escala (ℓ) del sistema en estudio está vinculada a la acción de los vientos, ondas y corrientes ambientales, que dará origen a remolinos. Las escalas de longitud característica de los remolinos corresponden al rango de alimentación (“input”) de la energía, escala (ℓ) que también está condicionada por las dimensiones definidas por la morfología costera.

Así, Zeidler (1978) explicó que la conducta de trazadores o contaminantes es controlada por tres grupos básicos de factores: advección, difusión y condiciones ambientales y de contorno.

Kraus et al (1982) presentaron los resultados de los experimentos de transporte de arena longitudinal. Realizaron experimentos con arena fluorescente en playas naturales y cercanas a estructuras para medir la tasa de transporte longshore a corto plazo. Con distintos colores inyectados en una línea que atraviesa la zona de surf se obtuvieron las distribuciones de la tasa de velocidad y transporte.

Según Ozmidov (1990), influye no sólo la velocidad de la corriente (V) sino que es más importante el gradiente V/L , donde L es una escala de longitud relevante como puede ser la profundidad del fondo marino, el espesor de la capa de mezcla o la profundidad de penetración de la corriente. Este mismo autor menciona que con el incremento de la velocidad de la corriente también aumenta el coeficiente de difusión. En cuanto a la escala temporal, ésta está intrínsecamente relacionada con la espacial.

Una de las dificultades básicas para comprender este proceso de difusión es el amplio rango de escalas del espectro de remolinos natural en los océanos, que normalmente hace imposible la separación de escalas del tiempo y del espacio (Bahia, 1997). Pero, en general, estas escalas se pueden establecer de acuerdo con las tablas 2.1 y 2.2:

Escala	Z. Rompientes	Mar abierto
Tiempo (s)	10^{-1} a 10^{-3}	1,0
Longitud (m)	10^{-1} a 10^{-4}	10^{-3}
Velocidad (m/s)	10^{-1} a 1,0	10^{-3}

Tabla 2-1. Escalas de tiempo y espacio en el océano (Bahia, 1997).

	Tiempo	Longitud	Velocidad
Olas	2.0 a 8.0 seg.	0.4 m a 7.5m	0.2 a 0.93 m/s
Corrientes de Marea	12 horas	1-6 ≈ Kms	1 Km/h
Corrientes Superficial	300 seg.	15 a 120 m	0.05 a 0.4 m/s
Viento	2.0 a 6.0 seg	1.8 a 36.0 m	0.9 a 6.0 m/s

Tabla 2-2. Escalas temporal y espacial en las áreas de investigación.

Rodriguez (1997) realizó un estudio teórico-experimental de la hidrodinámica de Zona de Rompientes. Hizo un análisis de más de 63 experimentos en la zona costera y presentó la organización y diseño de los experimentos Delta 93 y Delta 96, para identificar los principales procesos a multiescala de oleaje, corrientes y turbulencia. También introdujo técnicas de observación y comparó los resultados teóricos, con los datos instrumentales y con los del tratamiento de imágenes para la obtención de parámetros para calibrar modelos numéricos. En el trabajo identificó la coexistencia de una corriente longitudinal (1m/s) y una corriente de resaca de 25 cm/s.

Bahia (1997), puntualizó que los fenómenos que se dan en la zona costera están dominados por alguno de diversos factores básicos. Según este autor, las mareas son una forma transitoria de movimiento del agua costera, por lo que pueden ser contempladas también como corrientes cambiando en el tiempo. A la vez presentan las propiedades del flujo regular con sus características de dispersión y movimiento oscilatorio, con una advección resultante pequeña y dispersión específica. Así, las olas de viento y el mar de fondo, las ondas internas y los “surf beats” pueden ser agrupados en otro extremo de los factores de advección, opuesto al flujo transitorio “regular”. Los gradientes de la escala temporal están intrínsecamente relacionados con la escala espacial. Una de las dificultades básicas para comprender este proceso de difusión es el amplio rango de escalas del espectro de remolinos natural en los océanos, que normalmente hace imposible la separación de las escalas del tiempo y del espacio.

Artale et al. (1997) estudiaron la dispersión pasiva de trazadores en recintos cerrados.

Bezerra (2001) comparò resultados experimentales obtenidos mediante el análisis digital de imágenes de vídeo en zonas costeras de distintas características: Recife (Brasil) tanto en zonas abiertas como cerradas con dominio de la marea, Vilanova i la Geltrú playa encerrada entre espigones que producen circulación en celdas, Delta del Ebro con predominio de las corrientes longitudinales. Correlacionando los coeficientes de difusión con el número de Reynolds asociado al oleaje, se observa su gran dependencia de la turbulencia, difiriendo varios órdenes de magnitud.

Bouguet (2004 a y b) estudió la difusión de efluentes en corrientes mmarinas.

Bezerra et al (2009) Posteriormente realizaron campañas de campo en Brasil en 2006 en el puerto marítimo de Mucuripe, con mucho viento, en 2007 en el puerto fluvial de Miramar, cerca de una terminal petroquímica y en la desembocadura del río Paracauri en Soure con distintas fases de la marea.

En los últimos años los estudios se centran en el análisis de imágenes satélite o sistemas de monitorización como ARGUS.

2.3 RESUMEN DE ALGUNOS EXPERIMENTOS DE CAMPO CON IMÁGENES

Se presentan algunos experimentos de campo de otros autores relacionados con la presente tesis como:

- Delta 93: presentados por Rodriguez et al. (1997) y Bahia (1997).
- Vilanova y Recife. Bezerra (2000).
- Sistema ARGUS: Lipman y Holman (1989) y Holman et al. (1987 y 1992)
- Seguimiento de dragados: Osorio (2006)
- Pendientes en la zona de swash: Baldock y Hughes(2006)

2.3.1 Delta 93

La campaña Delta'93 fue el primer estudio español de caracterización detallada de la zona de rompientes en el litoral Mediterráneo. El objetivo fue obtener información 3D fiable y detallada de la hidrodinámica en zona de rompientes, dispersión de trazadores y transporte de sedimentos. Se llevo a cabo en la playa de la barra del Trabucador del Delta del Ebro por el Laboratorio de Ingeniería Marítima del 12 al 17 de diciembre de 1993, dentro del marco de los proyectos de investigación sobre hidrodinámica y zona de rompientes financiados por DGICyT, el MOPTMA y el programa MAST de la UE.

Previamente se estudiaron otras playas como la de El Far, La Marquesa y Los Eucaliptus, pero se eligió la del Trabucador por varios motivos:

- Características geométricas: longitudinalmente uniforme, con barras sumergidas más estables que el resto.
- Escasa carrera de marea: marea astronómica de menos de 30 cm, por lo que el nivel medio puede considerarse como cuasiestacionario.
- Ventajas logísticas: proximidad y disponibilidad de información meteorológica.

Se diseñó un soporte común (trineo de 2.5x2.5x1.8 m) para la adquisición armónica de los diferentes sensores: 6 correntímetros con una frecuencia de muestreo de 20 Hz, sensor de nivel a 4 Hz, 3 turbidímetros, compás digital, etc. con un datalogger común para la transmisión y almacenamiento de datos. El trineo se podía desplazar mediante unos trácteles para posicionarlo a diferentes profundidades y las medidas tenían una duración de 20 a 40 min.

Se hizo una topobatimetría previa y posterior y también se pusieron trampas de sedimentos. Simultáneamente, el equipo de vídeo grababa desde un grúa con un brazo de 20 m sobre la que había 3 cámaras (una color, una en blanco y negro y una portátil). Se realizaron 12 test agrupados en 5 casos (tabla 2.3).

Caso	Fecha	Energía	Espectro	Periodo Tp	Estado	Tests
I	26/05/93	Alto	Doble	18 y 3 (s)	No permanente	
II	15/12/93	Bajo	Ancho	7,5 (s)	Q-permanente	1-4
III	16/12/93	Medio-Alto	Estrecho	6 (s)	Q- permanente	5-7
IV	16/12/93	Medio	Estrecho	6,65 y 7 (s)	No permanente	8-12
V	17/12/93	Bajo	Ancho	7,5 (s)	Permanente	

Tabla 2-3. Casos de estudio de Delta 93 (Rodriguez et al. 1997b)

2.3.2 Vilanova y Recife.

Algunos de los resultados aquí analizados corresponden a experimentos realizados por Maria Ozilea Becerra en Vilanova, en una playa de 240 m confinada entre dos espigones en Vilanova i la Geltrú, donde sólo un fuerte oleaje puede producir corriente longitudinal y entonces se forman dos o más celdas de circulación entre la rotura del oleaje (aunque éste no fue el caso durante los experimentos). La ausencia de corriente longitudinal permitió analizar el efecto de las olas en la dispersión horizontal. Las imágenes se captaron a 10 m de altura y se vertieron boyas y manchas de leche.

Experimentos parecidos se hicieron en una playa semicerrada de Olinda, no muy lejos de Recife (Brasil), con un dique artificial exento, paralelo a la orilla y también se hicieron experimentos en el puerto de Recife (Figura 2.1).

En Brasil los experimentos obedecían sobretodo a la amplitud de las mareas muertas (“neap tide”) y vivas (“spring tide”), así como también sus estados: pleamar (“high tide”), marea de reflujo (“ebb tide”), bajamar (“low tide”), marea creciente (“flood tide” o “rising tide”). Las boyas utilizadas, según el modelo de Kjerfve & Medeiros (1989), consistían en 10 boyas de 10 cm de radio.

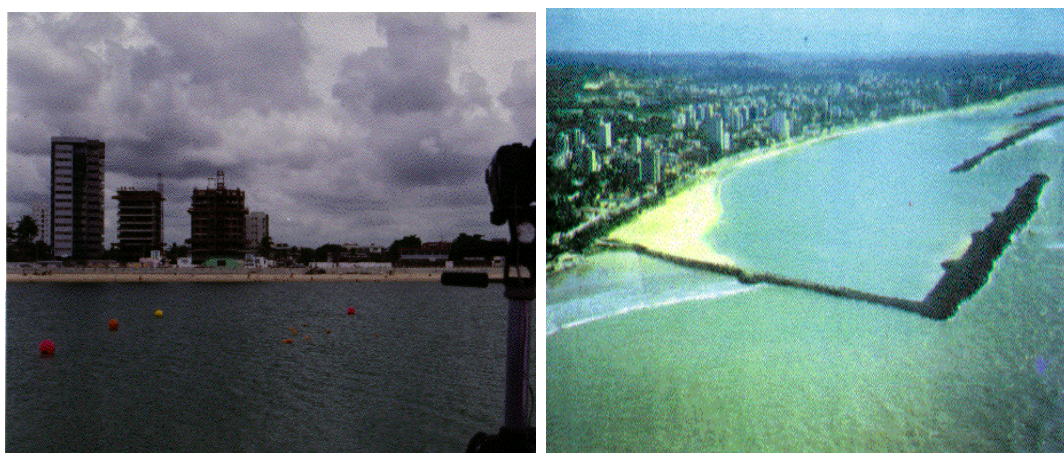


Figura 2-1. Campaña de Recife

Para estimar la evolución de los parámetros de dispersión de los trazadores en el tiempo, fueron tomadas series temporales (Figura 2.2 y 2.3) de acuerdo con la velocidad de propagación de la mancha, que era alta. Las series temporales fueron de unos 2 minutos con intervalos de 5 segundos y cuando era baja 5 o 6 minutos con intervalos de 30 segundos o 1 minuto.

Las mediciones para trazadores continuos fueron tomadas en un espacio bidimensional y en toda la extensión x e y , siendo en todos los experimentos la dirección x considerada paralelo a la línea de costa y la dirección y perpendicular. La imagen corregida ópticamente (figura 2.4) permitía determinar la evolución de las dimensiones de la mancha, por medio de un sistema cartesiano definido en el programa DigImage según la metodología de Díez et al. (1999).

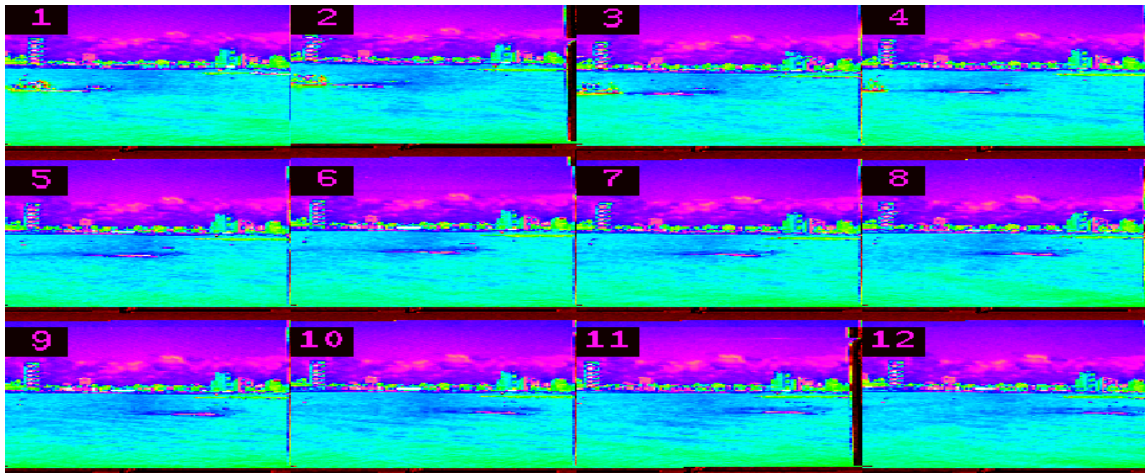


Figura 2-2. Evolución temporal de un trazador continuo. Olinda

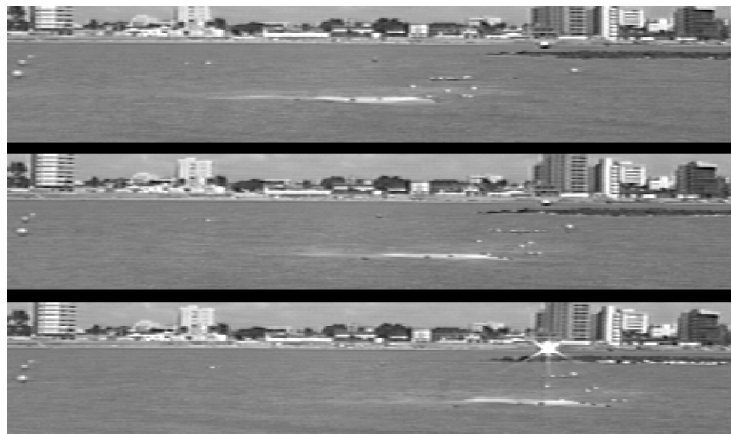


Figura 2-3. Secuencia en 3 tomas del trazador.



Figura 2-4. Manipulación de la variación de color (luz) para mejorar contraste

2.3.3 Sistema ARGUS

A continuación se hace un resumen del proyecto, experimentos y técnicas de teledetección desarrollados en el Coastal Imaging Lab de la Universidad Estatal de Oregón por la analogía con los experimentos desarrollados en este trabajo. La información se ha extraído de la web (<http://cil-www.coas.oregonstate.edu>).

El origen de ARGUS fue dar una respuesta a algunos problemas de la dinámica de olas infragravitatorias en condiciones tormentosas en la costa de Oregón. Con alturas de onda superiores a menudo a 5 m y zona de rompientes que puede llegar a 1 km de ancho, la toma de muestras con sensores tradicionales in situ se consideraba difícil.

La metodología del estudio se basaba en capturar series de tiempo de la zona de swash con ondas infragravitatorias en un tramo de playa longitudinal. En un fotograma, en un momento y ubicación de la zona de swash, se digitalizan manualmente los puntos fiduciales. Se utilizaron espectros de frecuencia de los datos resultantes para detectar y analizar onda de borde a gran escala (por ejemplo, Holman y Bowen, 1984).

Las imágenes promediadas de Argus fueron descubiertas por accidente, como parte de un estudio para detectar movimientos de ondas de borde longitudinales permanentes en una playa encajada. Para complementar los datos de swash ópticamente recopilados a lo largo de la playa, se decidió tomar imágenes promediadas de 10 minutos de la playa y de la costa utilizando una cámara de 35 mm con un filtro de densidad neutra de 13 tomas. La esperanza era que los patrones dominantes de onda estacionaria serían revelados directamente por un patrón nodal visible en la zona de swash. Mientras que los resultados fueron ambiguos, la imagen promediada (Figura 2.5) puso de manifiesto una sorprendente banda offshore de fuerte ruptura de olas que estaba relacionada con una barra de arena, lo que se demostró y se explica en Lippmann y Holman (1989). Otras investigaciones refinaron y ajustaron esta relación p. ej.; Aarninkhof et al. (2003).

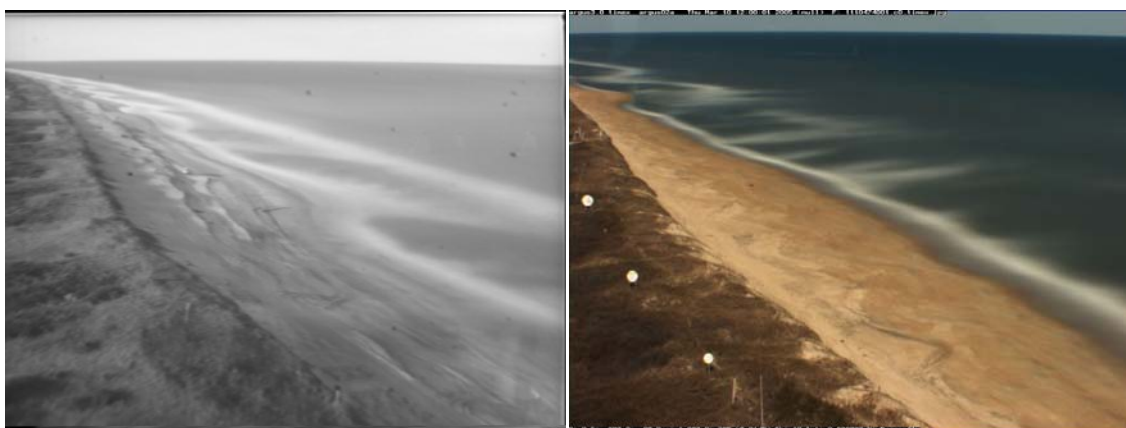


Figura 2-5. Una imagen promediada de Argus 0 y Argus III de Duck, Carolina del Norte, USA

El análisis a largo plazo de la variabilidad de la barra de arena a través de imágenes promediadas también comenzó fortuitamente al final del experimento de campo de SuperDuck en Duck, Carolina del Norte, en 1986. Se decidió dejar una de las cámaras de vídeo en la torre de observación, programada para recoger tomas diarias de 15

minutos de las ondas en la zona de surf. El valor y la necesidad de medidas a largo plazo y de bajo costo, de la variabilidad de la barra de arena, se hicieron evidentes. Argus 0 fue creado para cubrir esta necesidad con sistemas automatizados.

ARGUS I

Los tediosos procesos de captación de cintas de vídeo, envío y posterior promediado hicieron desarrollar la primera estación de Argus automatizada en 1992. Se trataba de una placa en un ordenador con DOS, situada en Yaquina Head, Oregón y conectado vía módem a la Universidad de Oregón para el procesamiento de imágenes de Dipix. Se trataba de señales analógicas de vídeo en blanco y negro de dos cámaras digitalizadas a 3,3 Hz y 640 x 480 píxeles. Las series fueron programadas cada hora.

La automatización de recopilación de datos y retorno había simplificado enormemente el proceso de toma de muestras y permitió el monitoreo continuo de lugares de interés científico sin intervención. Esta capacidad de monitoreo continua llevó a Paul O'Neil a bautizar el sistema como Argus, el perro de cien ojos de la mitología griega.

Debido a que las imágenes promediadas dan una imagen de morfología de playa sobre sólo una franja de playa (la zona de rompientes) que cambia de posición con la marea, se pensó en tomar imágenes promediadas diariamente para eliminar este efecto. Se introdujeron imágenes de variación como método para aislar a las ondas de la ruptura en la zona de surf de regiones brillantes, pero que no cambian. Estas técnicas permitieron estudiar la dinámica de barras y comportamiento de la costa a una escala mayor.

También se empezó a analizar con series temporales de píxeles a 2 Hz el campo de oleaje. Sin embargo, la tecnología de DOS no podía seguir el ritmo con las crecientes demandas de muestreo de series de tiempo y necesitaba una nueva generación de estaciones de Argus.

ARGUS II

Argus II fue diseñada en torno a una estación de trabajo de SGI O2 Unix, que tenía un entorno de computación robusto y flexible y una capacidad para digitalizar los datos de vídeo. Argus II se basó en las cámaras de color con imágenes digitalizadas en 640 x 480 píxeles a 2 Hz debido a la capacidad de vídeo de la SGI.

La limitación de Argus II radica en que SGI tenía sólo una entrada de vídeo y que podría digitalizar sólo una señal de vídeo en cualquier instante en el tiempo. Un conmutador de vídeo computarizado alternaba la digitalización de dos cámaras. Sin embargo, la sincronización no era bastante buena ($\frac{1}{4}$ de s de desplazamiento) y el análisis estéreo de las olas de la zona de surf no fue posible.

ARGUS III

Argus III se basa en las cámaras de vídeo digitales con resolución de 1024 x 768, 1280 x 960 o incluso mejor, píxeles, una considerable mejora en calidad respecto a Argus II. Todas las cámaras en un sitio están interconectadas a un equipo registrador mediante conexiones FireWire. Las cámaras captan a 2 Hz por un desencadenador

externo común para que las tomas sean verdaderamente sincrónicas y hace posible el análisis estéreo de objetivos móviles (olas) y programar series de tiempo y promediados de todas las cámaras a la vez según las necesidades.

Las principales estaciones están en: Agate Beach, Oregon; Duck, NC; Lake Erie, OH; La Jolla, CA; Black's Beach, CA; Waimea Bay, Hawaii; Noordwijk, Holanda; Palm Beach, Australia; Perranporth, UK; Teignmouth, UK; Muriwai, Nueva Zelanda; Egmond Aan Zee, Holanda; Bay St. Louis, MS; Monterey, CA; pero también en España: Santander, Barcelona (torre Mafre) y en la playa de Carchuna (Motril, Granada).

En la campaña de Duck, en enero de 1993, se instaló una cámara, sobre una torre a 44 m sobre el nivel del mar, desde donde se divisaba la playa de North Carolina. Este lugar fue elegido por el USACE para su estudio debido a sus singulares características: playa muy abrupta (pendiente 1:10) con frecuentes tormentas y huracanes. La línea de orilla está orientada a unos 340° N.

El clima de oleaje se caracteriza por alturas significantes $H_s = 1$ m y periodos de pico de 7 s. Los datos se registraron cada 3 h en una boya a 900 m de la orilla y 8 m de profundidad. La marea se medía en una estación costera cada 6 minutos. La carrera fue de 1,6 m con una media de 0,35 m sobre el nivel de referencia.

La batimetría se medía diariamente con precisión de cm gracias a CRAB, un vehículo de acero, de 10 m de alto, capaz de desplazarse sobre ruedas por la playa, equipado con un GPS. Se movía por la playa seca y la sumergida hasta calados de 5 m describiendo transectos longitudinales y transversales separados entre 20 y 60 m. Las características de la zona y la calidad de las medidas ofrecen un amplio conjunto de medidas precisas bajo distintas condiciones ambientales.

CAMPAÑA DE NOORDWIJK

En marzo de 1995 se instalaron dos cámaras en la azotea del hotel Huis ter Duin, desde donde se divisaba toda la playa de Noordwijk (Holanda). Se trata de una playa de arena orientada a 28° N. Dispone de postes longitudinalmente cada 250 m, cuyas coordenadas horizontales están referidas al sistema RD noruego y las verticales al nivel de la ordenanza holandesa, NAP. La batimetría de la zona comprende entre una y cuatro barras de arena, ligeramente oblicuas a la orilla, espaciadas entre 200 y 400 m. La batimetría se revisa una vez al año realizando perfiles de unos 800 m de largo cada 250 m. El oleaje de la zona es una composición de olas de viento y mar de fondo con alturas entre 0,8 y 1,3 m por el escaso fetch de la zona, cercana a Noruega. La altura significativa H_s y el periodo T_s del oleaje y la dirección y velocidad del viento se miden cada 10 minutos en una plataforma situada a 6 km de la costa y a 18 m de profundidad. La dirección del oleaje y su propagación se registran en otra estación a 25 km. La marea tiene una carrera media de 1,65 m y es muy asimétrica, con picos de pleamar y valles de bajamar.

Damiani y Molfetta (2008) emplearon el monitoreo webcam de la playa de Alimini (Italia) para desarrollar un modelo de gestión de zonas costeras en un entorno de MATLAB. El sistema consta de rutinas de promediado de imágenes, extrapolación, rectificación y georeferenciación. También incluye la corrección de la marea y la informatización de la pendiente en la playa.

De forma parecida se desarrollaron sistemas relacionados con la protección costera (Kroon et al., 2007), navegación (Medina et al., 2007), recreo (Jimenez et al., 2007) y otros.

A continuación se muestran algunas de las aplicaciones comercializadas por el Coastal Imaging Lab de la universidad de Oregon USA, extraídas de:

http://www.coastalwiki.org/coastalwiki/Argus_applications

EVOLUCIÓN COSTERA Y ANCHO DE LA PLAYA,

En la figura 2.6 se muestra un ejemplo de análisis de la evolución costera. En la imagen promediada y rectificada se identifican barras y corrientes de retorno que en la foto no son evidentes.

También se puede hacer el seguimiento del comportamiento de una regeneración en Florida (Figura 2.7) mediante la evolución de los perfiles transversales.

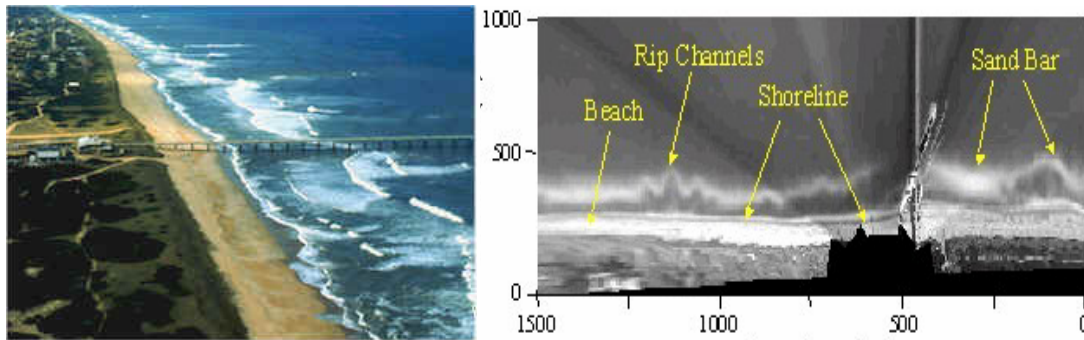


Figura 2-6. Ejemplo de imagen y resultados del sistema ARGUS. Cohen (2007)

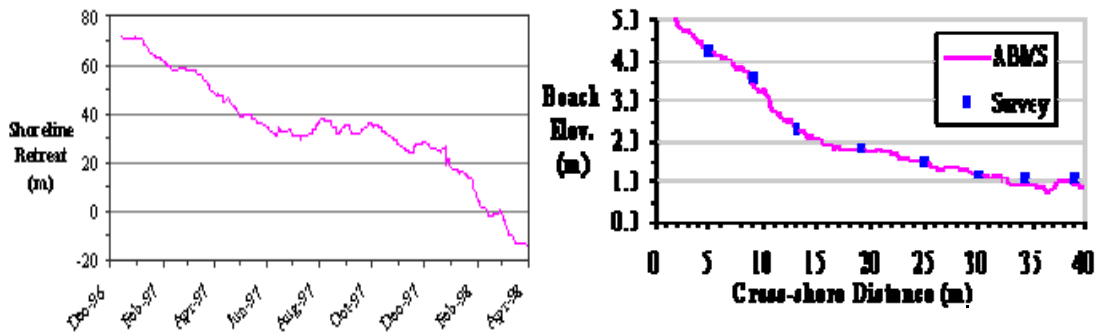


Figura 2-7. Evolución de la línea de orilla y del nivel de una playa regenerada en Florida con Argus Beach Monitoring Station. Cohen (2007)

En la Figura 2.8 se cuantifica como bascula en planta una playa, la de Bogatell en Barcelona.

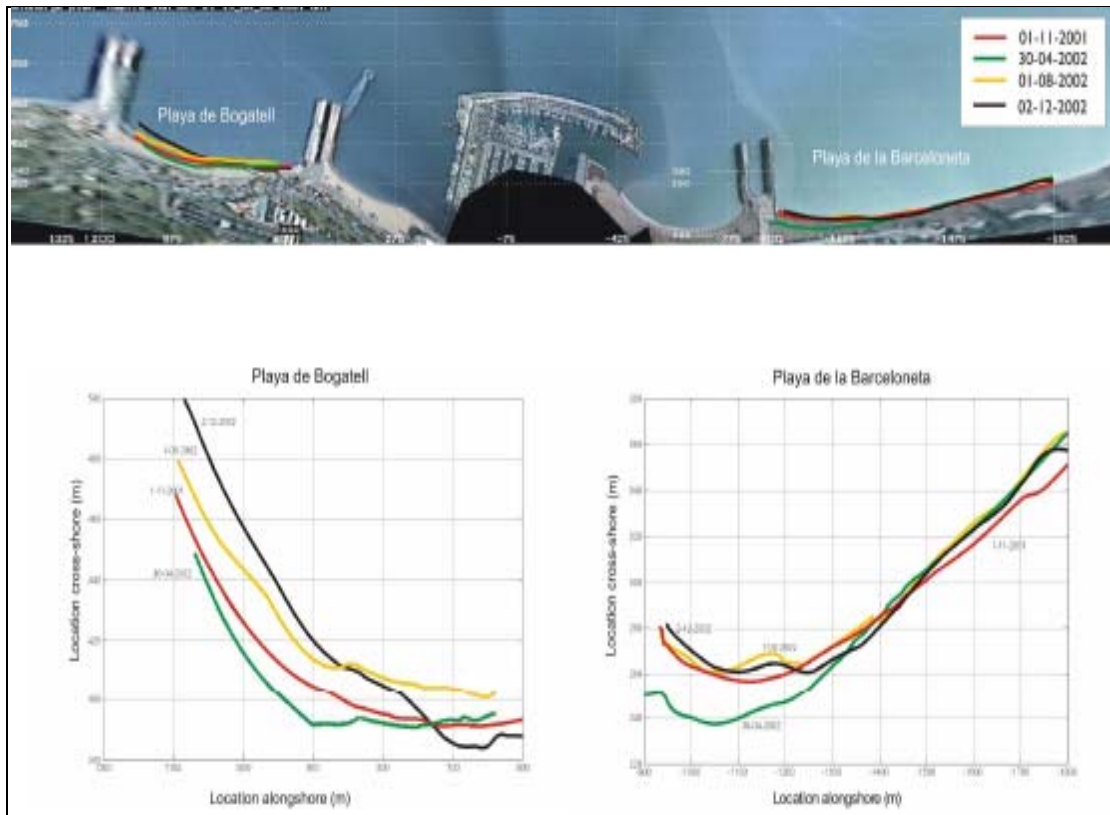


Figura 2-8 Cambios en Barcelona en las playas del Bogatell y Barceloneta. Guillen 2008.

CUANTIFICACIÓN DEL REMONTE

Remonte y rebase son dos de los mecanismos que pueden causar daño, o incluso el fracaso de las estructuras costeras. La posición del borde de resaca puede ser identificada visualmente por el cambio brusco en la intensidad entre la superficie de la playa más oscura y más clara “espumosa” del borde de la resaca. Este tipo de seguimiento obtiene información sobre el ataque del oleaje a las estructuras durante una sola tormenta o durante todo el año.

CAMBIOS MORFOLÓGICOS EN UNA PLAYA REGENERADA

En Egmond, Holanda, se determinan batimetrías de playa sumergida mensualmente en diferentes niveles del ciclo de marea (figura 2-9). La media de desplazamiento vertical es de menos de 15 cm a lo largo del 85% de la región de estudio de 2 km de ancho.

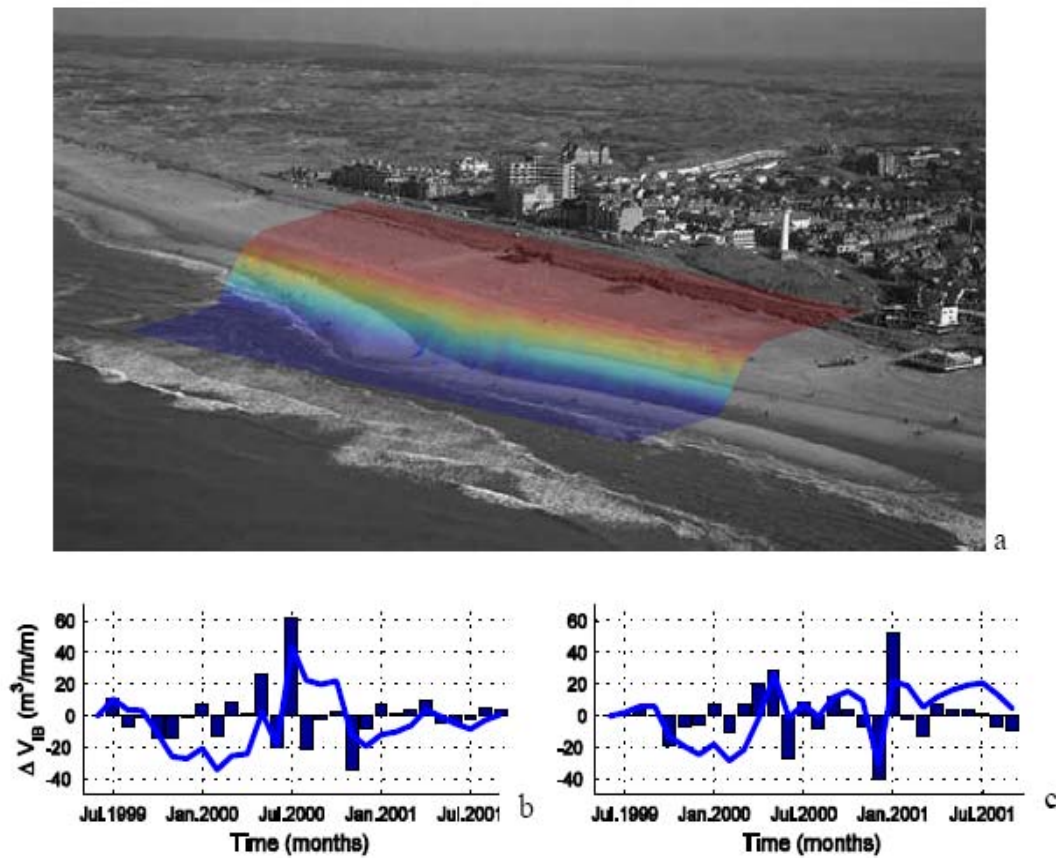


Figura 2-7 Batimetría en Egmond aan Zee según las imágenes Argus y los cambios analizados. Cohen A (2007)

MEDICIÓN DE LA BATIMETRÍA DE LA ZONA DE SURF

En Egmond, Holanda, se ha monitoreado la evolución de la zona de rompientes y su batimetría después de la regeneración de una playa en julio de 1999. La elevación del fondo es analizada continuamente según la técnica de disipación de oleaje. Este enfoque produce desviaciones marginales en el orden de 10 a 20 cm en la cara hacia el mar de las barras, que aumentan hasta 20 a 40 cm cerca de la cresta de barras. Los resultados muestran una migración hacia la costa de la barra exterior después de la regeneración (Figura 2.10), así como una acumulación neta de sedimento a lo largo de la parte superficial del perfil de playa por encima de la isóbata de 2 m de profundidad, lo que confirma el efecto beneficioso de la alimentación.

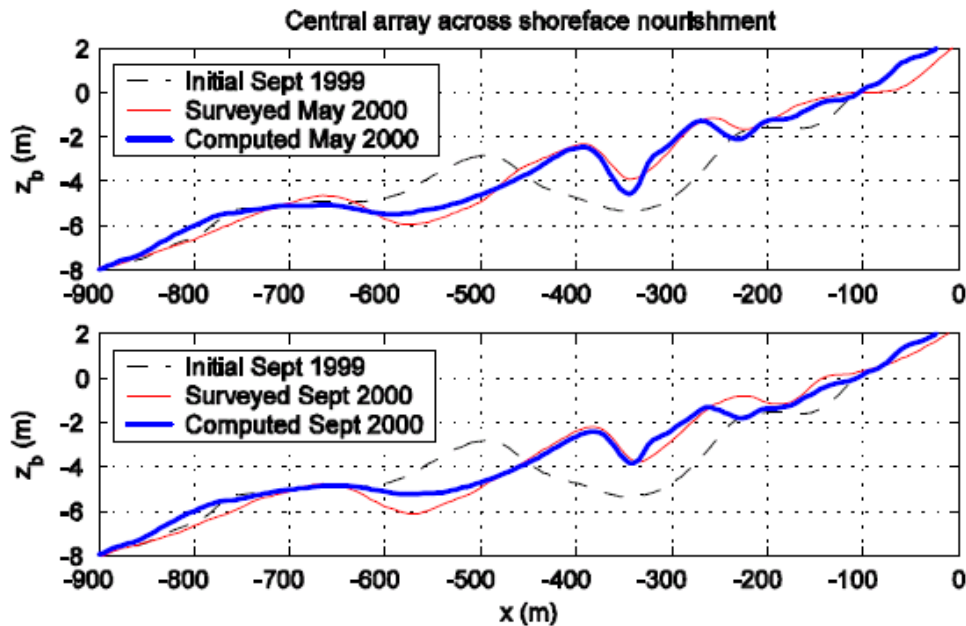


Figura 2-8. Batimetrías submareales derivadas de Argus (azul), en comparación con una batimetría medida (rojo) en mayo de 2000 y septiembre de 2000. Cohen (2007)

COMPARACIÓN DEL MODELO Y LAS OBSERVACIONES DE VÍDEO

El modelo Beach Wizard usa las observaciones de vídeo de alta resolución en combinación con un modelo morfológico 2DH para la predicción de la evolución batimétrica con una alta resolución en tiempo y espacio. El elemento clave del modelo es la actualización de la batimetría basada en las observaciones de vídeo de alta resolución Argus de la zona de rompientes. Esto se logra a través de patrones de la disipación de las olas, la celeridad de las mismas y la batimetría de la playa intermareal. Los intervalos de confianza se determinan para cada estimación batimétrica, para permitir una asimilación ponderada de las fuentes de datos diferentes y el modelo. Dada la alta resolución de las observaciones de vídeo en el tiempo, este enfoque permite el control casi continuo de la evolución de la batimetría de la zona de rompientes.

La aplicación al caso de Duck muestra que, en un corto espacio de tiempo (tormenta), el modelo es capaz de predecir con bastante precisión la batimetría, dada una secuencia de entradas a distancia observada. El modelo también es capaz de predecir el cambio de perfil con la configuración de los parámetros. La correlación es mejor para los meses de invierno, con señales más fuertes, que en los meses de verano. El comportamiento intra-anual muestra una gran variabilidad a largo plazo (décadas), por ello se calibran con perfiles topográficos en tierra.

2.3.4 Seguimiento de dragados en canales de navegación

Andrés Fernando Osorio Arias recibió el premio “Modesto Viguera 2006” por su tesis titulada “*Desarrollo de cámaras de video para hacer seguimiento de las actividades de dragado en los canales de navegación*” desarrollada en la Universidad de Cantabria y dedicada al desarrollo de nuevas técnicas, metodologías e indicadores para la utilización de imágenes de video en la gestión de las zonas costeras.

Desarrolló nuevos modelos que permitían obtener de forma automática perfiles intermareales de playa o un modelo para determinar la posición y marcos metodológicos que, aplicados al caso de la playa de El Puntal de Santander (Figura 2.11), permitieron demostrar la utilidad de los sistemas de video en la adecuada gestión de los usos de la costa: navegación, turismo... Igualmente, aplicó esta metodología al caso real del canal de acceso al Puerto de Santander. A continuación se hace un resumen de sus resultados extraído de <http://www.thecoastviewproject.org/>



Figura 2-9. Vista del Puntal. Osorio (2006)

El Puntal es una de las playas urbanas más importantes en el pequeño pueblo turístico de Somo, dentro de la Bahía de Santander (España). La evolución de la playa ha crecido, en los últimos 200 años, un 50%; así, marea y corrientes se han reducido drásticamente. Este cambio implica un estrechamiento del canal de acceso que se forma de la boca de la bahía. Por otra parte, un puerto comercial acoge buques mercantes cada vez más grandes, por lo que se necesita un canal de navegación con dimensiones mayores. Ambos efectos (mayores requisitos de canal de navegación y estrechamiento en la boca de bahía natural) no son compatibles y, por lo tanto, se requieren obras de dragado periódicamente.

El estudio es el resultado de tres años de trabajo en el GIOC, dentro del proyecto europeo CoastView (www.thecoastviewproject.org). El trabajo ha estado ligado a procesos morfodinámicos y a la interacción de playas ubicadas en zonas cercanas a vías navegables, así como al desarrollo de modelos numéricos y de modelos para el tratamiento de imágenes. El sistema consta de cuatro cámaras montadas sobre el

tejado del Hotel Real, aproximadamente a unos 90 metros sobre el nivel del mar y apuntando a la línea de costa. Cada hora, el sistema es capaz de tomar diferentes tipos de imágenes (snapshots, timex, variance) como la figura 2.12, recificarlas como la figura 2.13 y componerlas como en la figura 2.14.



Figura 2-10. Vista Panorámica de la playa desde las cámaras del Hotel Real.

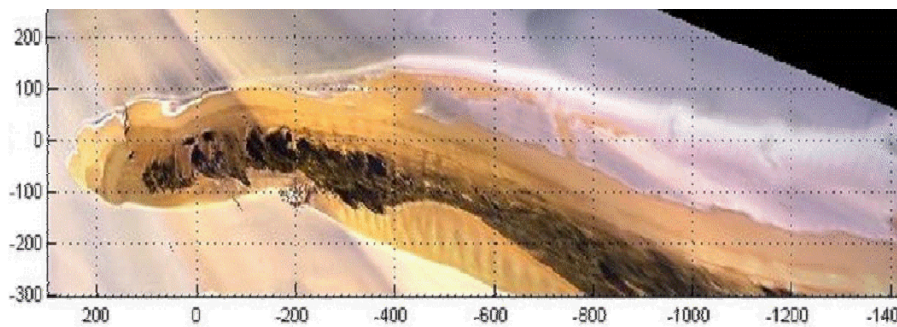


Figura 2-11. Imagen rectificada que muestra una barra de arena.



Figura 2-12. Vista compuesta de la playa de El Puntal. Osorio (2006)

2.3.5 Medida de la pendiente del agua en la zona de rotura.

Baldock y Hughes (2006) desarrollaron un sistema para obtener medidas instantáneas de la pendiente del agua con gradientes de presión horizontal en la zona de orilla. Colocaron una serie de 5 cables horizontales de 3 mm de diámetro naranjas y unas varas verticales (5 mm de diámetro) a intervalos de 5 cm (Figura 2.15), aunque podría utilizarse cualquier número y espaciado según sea necesario. No es preciso rectificar las imágenes ni orientar la cámara particularmente para tomar mediciones. Los mejores resultados se obtienen en sentido longitudinal, pero en la zona de swash de alta energía se pueden tomar fotografías en un ángulo aún más transversal. No hay ningún requisito para mantener el eje de la cámara horizontal, a menos que se desean líneas horizontales en la imagen. Las barras también permiten medir la velocidad de un frente incidente de swash a partir de registros de vídeo. En el estudio se colocaron

espaciadores a intervalos de 5 m, con barras verticales a intervalos de 1–2 m. La longitud total de los cables varió de 20 m en playas de pendiente suave a 5 m si son abruptas.

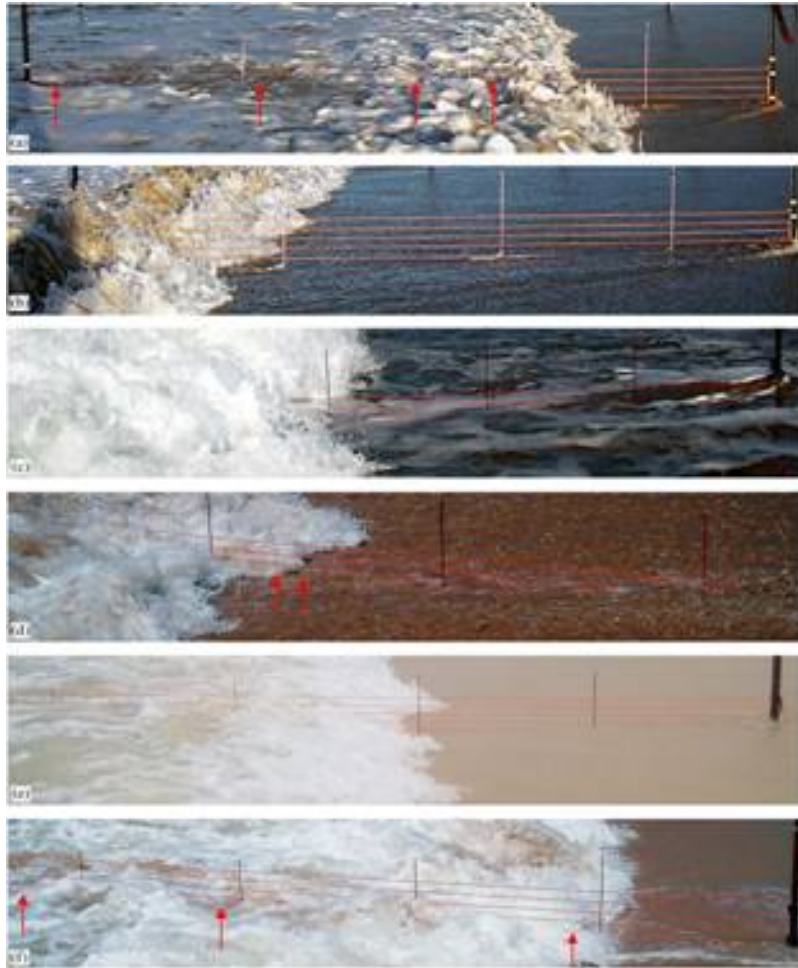


Figura 2-13 La pendiente instantánea de la superficie en el interior de la zona de surf y zona de swash. Baldock y Hughes (2006).

Mediante esta técnica se realizaron mediciones de:

- (a) Zona de surf interior y comienzo del agujero del colapso, playa de Belongil.
- (b) Voluta incidente y flujo de backwash supercrítico, playa de Belongil.
- (c) Imágenes de voluta incidente y flujo de backwash subcrítico, Ocean Beach.
- (d) Voluta incidente y flujo de backwash supercrítico, playa de Avoca.
- (e) Voluta incidente y flujo de backwash supercrítico, playa de Eagers.
- (f) Interior de la zona de voluta del colapso, playa de Avoca.

2.4 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA DIFUSIÓN TURBULENTA

Reynolds (1883) realizó los primeros estudios sobre turbulencia por descomposición de las ecuaciones de Navier-Stokes para explicar la turbulencia y caracterización del flujo laminar y turbulento.

Boussinesq (1877) introdujo el coeficiente de difusión de momentum turbulento K_m , para simplificar la Ecuación de Reynolds y la “viscosidad turbulenta” (μ_t).

çç

Einstein en 1905 estableció, en base en la teoría del movimiento Browniano, que el coeficiente de difusión D está definido por la ecuación diferencial de la varianza σ , ya que asume las fluctuaciones del flujo como regulares y, por lo tanto, proporcionales a un coeficiente de difusión constante.

$$D = \frac{1}{2} \frac{d(\sigma^2)}{dt} \quad \text{Ec. 2-1}$$

Richardson (1922) propuso que la energía se disipaba por el “fenómeno de cascada”. Definió un número que relacionaba los términos de gravedad respecto los de turbulencia y que resultó ser un parámetro de la eficiencia de mezcla. Para Reynolds la mezcla turbulenta y el transporte de momentum y calor son iguales, se difunden mediante remolinos parecidos, pero en flujos estratificados no es así debido a la presencia de ondas internas que no producen mezcla.

Prandtl (1925) clasificó el significado de las correlaciones $\overline{u'v'}$ y las relacionó con la difusión. Introdujo la teoría de la longitud de mezcla en los estudios de difusión por medio de la teoría de transferencia de momentum (lineal) por choques entre moléculas que se mueven de forma aleatoria, y definió un coeficiente de dispersión turbulento variable (K_m) en el espacio, recogiendo la variación espacial de la propia longitud de mezcla (l_m).

$$K_m = -l_m(x, y, z)^2 \left| \frac{d\bar{u}}{dz} \right| \quad \text{Ec. 2-2}$$

Taylor (1931, 1932 y 1935) describió las correlaciones $\overline{u'v'}$ y las relacionó con la difusión. Según su teoría del transporte por vorticidad $\partial/\partial t$, los pequeños remolinos tienen menor período de tiempo que los grandes.

Von Karman y Howarth (1938) buscaron diferentes “cierres” de las ecuaciones y aportó la hipótesis de similitud. Cada escala de flujo turbulento está asociada a una cierta energía, produciendo una transmisión de ésta de las escalas grandes a las pequeñas.

$$K_w = l_w K \frac{\partial w}{\partial y} \quad \text{Ec. 2-3}$$

- K_w coeficiente de transporte por vorticidad;
- K constante de Von Karman;

- l_w distancia que viaja el vórtice hasta romper;
- $\partial w / \partial y$ gradiente de vorticidad en eje y .

En lugar de tener en cuenta los cambios de momentum lineal de una capa a otra, consideró los cambios de momentum angular o vorticidad.

Estudió la capa límite atmosférica y estableció que cuando una hay frontera el flujo transfiere momentum mediante tensiones horizontales según una difusión turbulenta proporcional a la distancia a la frontera ($dU/dz = u^*/kz$). Para la atmósfera el coeficiente de proporcionalidad es $k=0,41$. En cambio en flujos estratificados o en rotación este perfil logarítmico no es válido.

Kolmogorov (1941) sugirió que la energía turbulenta (K) y la frecuencia (f) pueden ser determinadas por diferentes ecuaciones del transporte. Basado en el fenómeno de energía de cascada, Richardson (1922) propuso asumir que la disipación de energía es constante y que existe una analogía entre difusión turbulenta y molecular, pudiendo la viscosidad ser reemplazada por el coeficiente de difusión de remolinos. La teoría de Kolmogorov coincide con la de Richardson con la hipótesis de transformación de la energía de forma local a las diversas escalas.

$$D = \alpha \ell_*^{4/3} \quad \text{Ec. 2-4}$$

Prandtl (1945) describió algebraicamente la escala de longitud.

Richardson y Stommel (1948) dieron una relación empírica referida a la ley de 4/3. Richardson postuló que existe una variable independiente en turbulencia debido a las fluctuaciones del flujo; por esto no se puede precisar con exactitud la posición de una partícula, pero se puede estimar, hasta cierto punto, la separación entre partículas en un material en difusión, por la ecuación siguiente que es similar a la 2ª Ley de Fick que da una difusividad K aproximada en función de la escala de longitud (ℓ) de la difusión de la concentración (c) de una sustancia en el tiempo (t).

$$\frac{\partial [c(\ell)]}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \ell} \left[K(\ell) \frac{\partial c(\ell)}{\partial \ell} \right] \quad K(\ell) = \varepsilon \ell^{4/3} \quad \text{Ec. 2-5}$$

Goldstein (1951) y Michelson (1954) propusieron una ecuación hiperbólica que esta basada en las fluctuaciones del flujo y prevé la utilización de un coeficiente de difusión no constante.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \nabla^2 c - \frac{D \partial^2}{V^2} \quad \text{Ec. 2-6}$$

Joseph y Sender (1958) obtuvieron una relación que da los cambios de difusividad con la escala, ya que la tasa de disipación P aumenta con la distancia r .

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\text{Pr}^2 \frac{\partial c}{\partial r} \right) \quad \text{Ec. 2-7}$$

Gunnerson (1959 a, b) derivó un coeficiente de difusión horizontal según el efecto de la oscilación vertical por oleaje w . Incluía el efecto de escala del fenómeno de la difusión de Fick, con $\alpha=0,005$ para difusión sin restricción lateral y $\alpha=0.0025$ para difusión con restricción lateral.

$$\frac{\alpha (w_1 + w_2)^{4/3}}{2} = \frac{w_2^2 - w_1^2}{32 (t_2 - t_1)} \quad \text{Ec. 2-8}$$

Brooks (1960) propuso un coeficiente de difusión horizontal que no considera el efecto del oleaje. La ecuación para la concentración (c) de la línea central del eje de la dispersión de la pluma, está basada en la ecuación de difusión convencional para una línea, solo que substituye el coeficiente de difusión por la ley de 4/3.

$$\ell(x) = C_o e^{-kx} \operatorname{erf} \left[\sqrt{\frac{\frac{3}{2}}{\left(\frac{1 + 2x}{3\beta \cdot b}\right) - 1}} \right] \quad \text{Ec. 2-9}$$

A la escala del fenómeno L es definido en términos de desviación standard σ de la distribución de la concentración c .

$$L/b = \left(1 + \frac{2}{3} \beta \cdot \frac{x}{b}\right)^{3/2} \quad L = 2\sqrt{3}\sigma \quad \text{Ec. 2-10}$$

Obukhov (1949 y 1962) desarrolló la teoría estadística de la turbulencia atmosférica.

Kolmogorov (1962) propuso una nueva revisión de la K (1941), con escala indeterminada para el exponente, describiendo un modelo log-normal.

Masch (1961) a partir de una ecuación de difusión convencional, presentó una ecuación de difusión respecto la distancia s del punto de origen para coeficiente de difusión constante D y de acuerdo con la ley de 4/3:

$$c(x) = \frac{s}{4\Pi} D_o |x| = \frac{(27) u_s^2 s}{(4)^6 \Pi \alpha^3 x^3} \quad \text{Ec. 2-11}$$

Las ecuaciones son dadas con respecto a la concentración de la línea central. También definió la escala del fenómeno a partir del punto de origen de la desviación standard de la distribución de concentración para 4 tiempos, y de acuerdo con la ley de 4/3 obtiene:

$$Lx = \left[\frac{32 \alpha x}{3us} \right] \quad \text{Ec. 2-12}$$

Para una difusión con coeficiente constante una relación parabólica convencional

$$Lx = \left(\frac{32 D_o x}{us} \right)^{1/2} \quad \text{Ec. 2-13}$$

Masch (1963) postuló que el coeficiente de difusión puede ser medido por el grado de dispersión y puede ser calculado por la corriente de superficie y por la desviación standard de la distribución de las partículas.

Inman et al. (1971) definieron un coeficiente de difusión ε para una distribución gaussiana de la concentración con una varianza de la distribución del trazador σ^2 . También lo establecieron para remolinos en zona de rompiente ("surf").

$$\varepsilon = \frac{\sigma^2}{2t} \quad \text{Ec. 2-14}$$

Tritton (1989) definió el coeficiente de difusión (Kc) dependiente del fluido y de la sustancia difundida, donde la concentración (c) es dada por la masa de la sustancia por unidad de volumen y que varía continuamente en función de la posición en el tiempo t .

$$\frac{Dc}{Dt} = Kc \nabla^2 c \quad \text{Ec. 2-15}$$

Ozmidov (1990) estableció que las curvas de concentración son gaussianas o normales, por tanto son simétricas, y la dispersión puede ser obtenida directamente por un método estadístico para calcular la desviación standard.

$$\sigma^2 = 2Kt \quad \text{Ec. 2-16}$$

K es el coeficiente de difusión turbulento promedio y t es el tiempo.

La concentración decrece exponencialmente con el tiempo. esta relación ocurre solo en el caso de dispersión gaussiana.

Faber (1995) sugirió que la Teoría del Caos podría conducir a un entendimiento profundo de fluidos turbulentos en general.

Fung y Vassilicos (1998) hicieron un análisis dimensional, suponiendo que la dispersión relativa D^2 es sólo una función local de la energía espectral $E(D)$, esto es, que sólo los remolinos del tamaño de la mancha son relevantes para la dispersión D^2 . Pero para $m > 3$, los resultados experimentales no coinciden con esta fórmula teórica, sino más bien hacia la estabilización de una constante 4 - 8 en función de si la energía total se mantiene constante o sólo la energía de las escalas integrales se mantiene constante.

Castilla (2001) hizo una simulación cinemática de flujo turbulento aplicada a la dispersión de partículas en tiempos intermedios, con dos métodos numéricos:

- Simulación Numérica Directa (DNS), con la que se resuelven, de forma explícita, todas las escalas de un flujo turbulento a partir de las ecuaciones de la dinámica. Esto limita fuertemente el número de Reynolds de la simulación.
- Simulación Cinemática (KS), como la superposición de una serie de modos de Fourier, donde la única ecuación de la dinámica que se considera es la condición de continuidad. No hay malla de discretización ni extrapolación a pequeñas escalas de espacio y tiempo, lo que le hace especialmente atractivo para análisis Lagrangiano.

Realizó dos series de experimentos:

- En la primera varió la ley espectral manteniendo uniforme la energía total del campo y propuso una expresión para la función de estructura de orden p en función de la escala y de la ley espectral, para escalas menores que la microescala de Taylor.
- En la segunda varió la ley espectral manteniendo uniformes las escalas características del campo, con fuertes variaciones de energía. Observó que se

cumple la ley de Richardson generalizada, independientemente de la energía del campo, para espectros con potencia menor que 2.

Posteriormente en Castilla et al. (2007) realizan una generalización del estudio a procesos no lineales.

Matulka (2009) realizó experimentos en flujos estratificados de dos capas estables de agua salada y dulce, agitados con una rejilla y también analizó numerosas imágenes de satélite SAR. Comparó la energía potencial obtenida con la energía cinética disponible y la eficiencia relativa de la mezcla. También comparó los resultados con la simulación numérica. Concluyó que el papel del número de Reynolds, el de Richardson y de Rossby, tanto en los experimentos y en las visualizaciones del océano es muy importante para interpretar efectos antes de desconectar el comportamiento turbulento 2D y 3D. Las interacciones de ondas y vórtices dependen del nivel de enstrofia (ver anexo 1 de teoría de turbulencia). El análisis fractal de los vórtices y el análisis de la intermitencia, obtenida como correlaciones espaciales de la disipación turbulenta, permiten explicar comportamientos distintos para niveles de energía iguales y el complejo equilibrio entre la cascada directa 3D tipo de Kolmogorov y la cascada inversa 2D tipo Kraichnan.

Sekula y Redondo (2009) investigan los chorros turbulentos y los efectos relacionados con ellos, como la capa límite y el efecto de una geometría 2D. El trabajo se basa principalmente en resultados experimentales y de campo para entender los procesos de interacción que conducen a la mezcla y el transporte de masa en zonas límite y sin capas de corte. Se compara la estructura de imágenes SAR (Synthetic Aperture Radar) de los chorros costeros y vórtices y resultados experimentales de imágenes de plumas de aviones en relación al número de Reynolds. Se comparan los efectos de pared y los límites de la estructura de chorros turbulentos (3D y 2D) que no son homogéneos, el desarrollo de multifractal y técnicas espectrales.

3 CONTAMINACIÓN MARINA POR HIDROCARBUROS

En nuestra sociedad, los derivados del petróleo son la fuente principal de energía. Los accidentes con hidrocarburos han protagonizado episodios de contaminación trágicos para la biosfera y sobre todo, el océano. La complejidad de los procesos físicos, químicos o biológicos que actúan sobre el petróleo derramado en el mar, hacen difícil su estudio en laboratorio. Visto el problema y la necesidad de tomar decisiones urgentes e inteligentes sobre nuestro futuro, se han hecho numerosas campañas de campo.

La literatura de los efectos ecológicos de contaminación por hidrocarburos es muy voluminosa y han aparecido muchas revistas especializadas; en este capítulo se presenta un resumen de estos efectos.

3.1 ANTECEDENTES DE FUENTES DE VERTIDOS

En el año 1859 se perforó el primer pozo de petróleo. Desde ese momento ha aumentado la producción y demanda de hidrocarburos, como se muestra en la figura 3.1 en millones de barriles Bren (mbd), según información de la International Association of Independent Tanker Owners 2010 (www.intertanko.com).

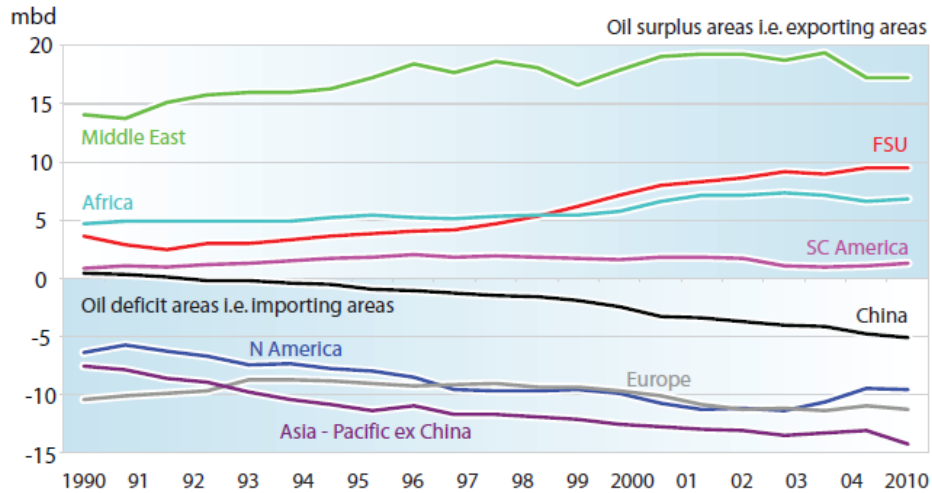


Figura 3-1. Evolución de la producción y demanda de hidrocarburos por zonas y años

Una parte de los hidrocarburos que llegan al mar es por causas naturales, a través de filtraciones de estratos geológicos (Albargés, 1980). Se estima que puede llegar al 45% del total. Los de origen antrópico pueden llegar al mar por diferentes vías, además de los accidentes. extracción, transporte, consumo. Según el Committee on Oil in the Sea III (2002): Inputs, Fates, and Effects: http://books.nap.edu/html/oil_in_the_sea en la década de los noventa las fuentes de vertidos fueron tal y como muestra la figura 3.2.

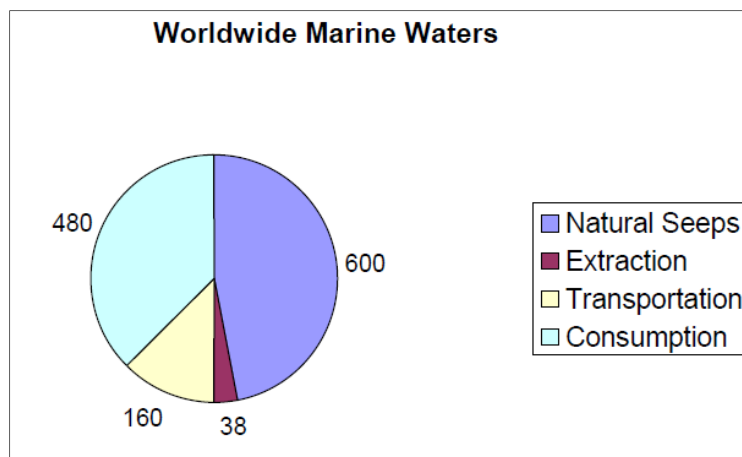


Figura 3-2. Media anual entre los años 1990-1999 de las fuentes de hidrocarburos en miles de toneladas. Oil in the Sea III (2002)

En 1920 se prohibió la descarga de hidrocarburos en aguas costeras de Europa y Estados Unidos. Después de la II Guerra Mundial, las demandas energéticas de

combustible y la necesidad industrial de derivados del petróleo invalidaron el acuerdo de paz. Enormes cantidades de crudo eran transportadas por los océanos, especialmente del Medio Oriente a Europa. En la plataforma continental se instalaron plantas de extracción que suponían el aumento de la cantidad de crudo vertido y el riesgo de un accidente de gran potencial másico. Los trabajos de Gade et al. (2006) y Redondo y Platonov (2009) ayudan a confirmar estos resultados en la zona costera europea, demostrando además la influencia de la Ley de Zipp (distribución hiperbólica entre los accidentes y su tamaño).

A continuación se citan algunos de los vertidos más importantes que ha habido debido a derrames del cargamento de barcos petroleros por accidente. Son los que han causado mayor alarma social por las graves consecuencias que se derivan de la liberación de grandes cantidades bruscamente, provocando las llamadas mareas negras.

El primer gran accidente referenciado en la bibliografía es el del petrolero Torrey Canyon, el 18 de marzo de 1967. Este barco embarrancó en una roca llamada Pollad Rock, situada cerca de las costas bretonas, en una de las Seven Stones. Contenía 119.000 toneladas de petróleo. Al embarrancar se rompieron varias cisternas y al inundarse se fue rompiendo hasta partirse en dos el 28 de Marzo y finalmente hundirse el día 30. Unas 14.000 toneladas llegaron a la costa, al Cabo Cornualles, afectando 150 km. Para eliminarlo se utilizaron 10.000 toneladas de detergentes. Posteriormente resultó que la elevada toxicidad de dichos detergentes fue la principal causa de la elevada mortalidad de flora y fauna, más que el propio vertido. Fue el primer error grave debido a la inexperiencia, pero sirvió para evitar errores posteriores.

Después de este caso, se produjeron otros menos graves. En 1974 el Peter Maersk tuvo un accidente; en 1976 el petrolero Boehlen; en 1977 el Ekofisk. La noche del 16 al 17 de marzo de 1978 el Amoco Cádiz encalló cerca del Cabo Finisterre, con 223.000 toneladas de petróleo ligero y 4.000 toneladas de fuel pesado que se vertieron en doce días. La agitación del oleaje produjo que las fracciones ligeras, de baja viscosidad, se emulsionaran dando una gran "mousse de chocolate". Después de este accidente el gobierno francés invirtió millones de francos en investigaciones para prevenir o luchar contra las mareas negras.

En 1979 se produjeron dos accidentes de petroleros, el Gino y el Ixtoc. En 1980 embarrancó el Tanio liberando 7.000 toneladas en una zona de costas que ya había sido afectada por el Amoco Cádiz. En 1983, se embarrancó el Golfo Pérsico. El 24 de marzo de 1989 un petrolero estadounidense, el Exxon Valdez, embarrancó en los peñones de Bligh, Alaska. Se vertieron 40.000 m³ de petróleo bruto, proveniente de la bahía de Prudhoe, que formaron una emulsión estable provocando menores daños que los anteriores grandes accidentes.

En 1991, Irak realizó un vertido deliberado en el noroeste del Golfo Árabe, vertiendo entre 500.000 y un millón de toneladas de petróleo bruto de Kuwait. El 3 de Diciembre de 1992, el petrolero griego Mar Egeo embarrancó a la entrada de la Ría de la Coruña con casi 80.000 toneladas de crudo. El barco se rompió y explotó, liberando casi la totalidad de su carga que afectó a unos 200 Km de costa.

El 13 de noviembre de 2002 el Prestige, con 77.000 toneladas de fuelóleo, se parte y hunde a unos 250 km de la Costa da Morte, Galicia (Figura 3.3). El derrame de petróleo del Prestige fue considerado el tercer accidente más costoso de la historia; la limpieza del vertido y el sellado del buque tuvieron un coste de 12.000\$ millones,

según [/www.wreckedexotics.com/articles/011.shtml](http://www.wreckedexotics.com/articles/011.shtml), el doble que la explosión del Challenger pero por detrás de la desintegración del Columbia y el accidente nuclear de Chernobyl (Zamora J 2003).



Figura 3-3. Accidente del Prestige

El buque frigorífico 'Sierra Nava' quedó varado en la bahía de Cádiz el 28 de enero de 2007 al intentar entrar en el puerto de Algeciras en medio de una tormenta, con 350 tn, afectando 10 km de costa del Estrecho.



Figura 3-4 El Sierra Nava varado en la playa.

Con la rotura de un oleoducto de BP a 1.525 metros de profundidad marina en el Golfo de México, el 20 de abril de 2010, se vertieron 4,9 millones de barriles de petróleo al mar Caribe, lo que dio lugar a una mancha de petróleo de 35 kilómetros de largo por 1,5 de ancho, que en agosto continuaba a la deriva por las aguas del golfo de México, (Figura 3.5) según datos publicados en la revista Science por la Institución Oceanográfica Woods Hole de Massachussetts. La compañía invirtió más de 6.100 millones de dólares en la limpieza y debe afrontar las demandas de más de 145.000 afectados que pueden ascender a 30.000 millones de dólares, según <http://www.informador.com.mx/>.



Figura 3-5. Imágenes de la rotura del oleoducto de BP en el Golfo de México

El pasado 10 de agosto de 2011 una fuga en una plataforma de Shell situada a 180 kilómetros de Aberdeen (Escocia), liberó al mar, según los cálculos de la empresa, 216 toneladas de crudo o 1.300 barriles, el mayor derrame en una década en la zona.

3.2 PROPIEDADES DE LOS HIDROCARBUROS

El petróleo, ya sea crudo o destilado, se trata de una compleja mezcla de hidrocarburos, moléculas de carbono e hidrógeno con pequeñas cantidades de sulfuro, oxígeno y nitrógeno, dando lugar a compuestos inorgánicos y organometálicos que varían con el tiempo, envejeciendo, tal y como describen Fernández Varela et al. (2007).

Según los enlaces entre los átomos de carbono, los hidrocarburos se clasifican en:

- Hidrocarburos alifáticos, los cuales carecen de un anillo aromático, entre ellos:
 - Hidrocarburos saturados (alcanos o parafinas)
 - Hidrocarburos no saturados o insaturados (alquenos o oleofinos y alquinos)
- Hidrocarburos aromáticos los cuales presentan estructura cíclica:
 - Benceno
 - hidrocarburo aromático policíclico (HAP)

Los alcanos son cadenas de átomos de carbono con enlaces de hidrógeno y pueden presentarse como cadenas rectas, ramificadas o cerradas. Como en muchos componentes orgánicos, a mayor número de átomos de carbono en una molécula, mayor es su punto de ebullición y menos volátil es. Alcanos de bajo punto de ebullición producen anestesia y narcosis a bajas concentraciones y a altas concentraciones pueden causar daños celulares y la muerte masiva de gran variedad de pequeños invertebrados. Alcanos de alto punto de ebullición se producen por procesos biológicos y están presentes en todos los organismos marinos. Estos derivados del petróleo no son tóxicos normalmente, sin embargo, pueden afectar a la conmutación química e interferir con procesos metabólicos.

Los alquenos no se encuentran en el crudo, son un producto de la destilación que se encuentra en productos refinados como la gasolina. Son más tóxicos que los alcanos pero menos que los aromáticos.

Los hidrocarburos aromáticos no son comunes en la naturaleza. Se caracterizan por tener cadenas cerradas de seis átomos de carbono con tres enlaces dobles C=C, llamadas anillos de benceno. Se encuentran virtualmente en todos los productos petrolíferos y son muy solubles en agua. Los de bajo punto de ebullición son los componentes más tóxicos de efecto inmediato, siendo letales incluso diluidos. Los de alto punto de ebullición, especialmente los multianulares, son venenos a largo plazo y se les llama *carcinógenos*.

El comportamiento físico y los efectos biológicos de un vertido dependen en gran medida del tipo de hidrocarburo. Dependiendo de su composición, se determinará su velocidad de dispersión, grosor de la película superficial, formación de emulsiones crudo-agua y agua-crudo, atenuación de la luz, permeabilidad del oxígeno, toxicidad y la efectividad de las técnicas de limpieza. Por ejemplo los fuel-oil ligeros contienen más aromáticos que los pesados y por tanto serán más tóxicos, pero los pesados pueden producir más daños mecánicos al hábitat intermareal por asfixia o atrapamiento.

Según la EPA (<http://www.epa.gov/emergencies/content/learning/crude.htm>) los hidrocarburos se clasifican en 4 categorías:

- Clase A: ligeros o volátiles. Son muy fluidos, a menudo de color claro, se propagan rápidamente en sólido o superficies de agua, tienen un olor fuerte, una tasa alta de evaporación y son generalmente inflamables. Penetran en superficies porosas como tierra y arena y pueden ser persistentes en esa matriz. No tienden a adherirse a las superficies; lavando con agua generalmente se eliminan. Pueden ser altamente tóxicos para los seres humanos, peces y otra biota. Productos más refinados y muchos de los crudos ligeros pueden incluirse en esta clase.
- Clase B: no adhesivos. Tienen un aspecto ceroso o graso, son menos tóxicos y con adhesión más fuerte a las superficies que los de clase A, aunque pueden ser quitados de superficies con un lavado vigoroso. Con la temperatura aumenta su tendencia a penetrar sustratos porosos y pueden ser persistentes. La evaporación de volátiles puede conducir a un residuo de clase C o D. Hidrocarburos medios y pesados de parafina son de esta clase.
- Clase C: Son característicamente viscosos, pegajosos y de color marrón o negro. El lavado con agua no es suficiente para su limpieza, pero el petróleo no penetra fácilmente en superficies porosas. La densidad de hidrocarburos de clase C puede estar cerca del agua y a menudo se hunden. La meteorización o evaporación de volátiles puede producir hidrocarburo de clase D sólidos o sustancias pegajosas. Su toxicidad es baja, pero la vida silvestre puede ser asfixiada o se ahogada cuando es contaminada. Esta clase incluye restos de combustible y crudos semipesados.
- Clase D: grasas; son relativamente poco tóxicos, no penetran en sustratos porosos y son generalmente de color marrón oscuro o negro. Cuando se calientan, pueden derretirse y forman una capa haciendo muy difícil la limpieza de superficies. Hidrocarburos residuales, crudos pesados y parafina pesada.

El medio produce alteraciones por procesos de tipo físico- químicos y biológicos (Figura 3.6 y 3.7). Los procesos físicos producen la dispersión y envejecimiento del crudo mediante la evaporación, disolución, emulsión, extensión, adsorción y sedimentación. Los procesos bioquímicos producen la transformación y mineralización del petróleo hasta convertirlo en CO₂ + H₂O por oxidación y degradación biológica.

La evaporación afecta a los componentes de bajo punto de ebullición, produciendo la pérdida selectiva de los componentes de bajo peso molecular. El índice de evaporación depende, en primer lugar, de la presión de vapor del hidrocarburo, reforzada por el viento, la rugosidad de la superficie, la alta temperatura, irradiación y superficie. Algunos componentes se evaporan lentamente, formando un residuo sobre la superficie de alto peso específico, mayor viscosidad y concentraciones de sulfuro que el crudo inalterado; incluso puede tener mayor peso específico que el agua del mar y precipitar, aunque no es muy normal.

Respecto a la disolución de hidrocarburos de bajo peso molecular, para el mismo punto de ebullición los aromáticos son más solubles que los alcanos, (Borthwick y Joynes 1989). Este proceso se complementa con la formación de emulsiones: petróleo-en-agua con la ayuda de agentes activos, y agua-en-petróleo que se produce de forma natural, dando lugar a la llamada “mousse de chocolate”, difícil de dispersar y de lenta degradación.

La oxidación química puede ser de tres tipos: atmosférica, fotooxidación o catalizada. Los requerimientos para disolver el oxígeno en el petróleo hacen que este proceso sea insignificante respecto a otros.

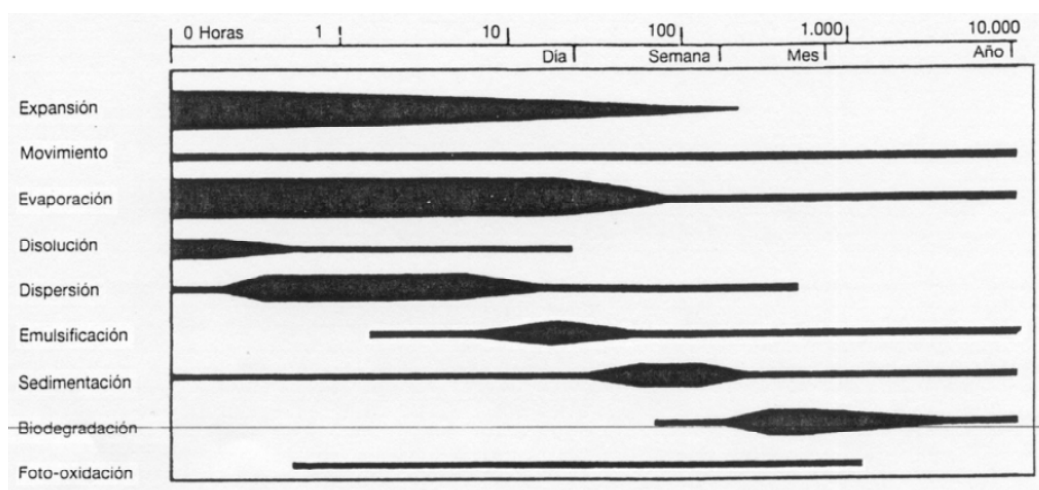


Figura 3-6. Tiempo de expansión e importancia relativa de los procesos de un derrame de hidrocarburos. Fuente: Ministerio de O. Públicas, Transportes y Medio Ambiente, 1995.

La biodegradación por bacterias tanto aerobias como anaerobias, en general, afecta series homólogas de aproximadamente en el mismo tamaño. Preferentemente atacan alcanos normales reduciendo su tamaño entre la cadena recta y ramas adyacentes. Parece haber una preferencia por los alcanos ramificados, después los ciclo-alcanos y por último los aromáticos. Junto con la disolución, la biodegradación produce un aumento relativo del contenido aromático y por tanto de la toxicidad.

Se han encontrado más de 100 especies capaces de oxidar hidrocarburos, cada una degrada una componente y en unas determinadas condiciones (pH, oxígeno, nutrientes, salinidad). Normalmente los factores limitantes son el oxígeno y los nutrientes (Solanas 2002).

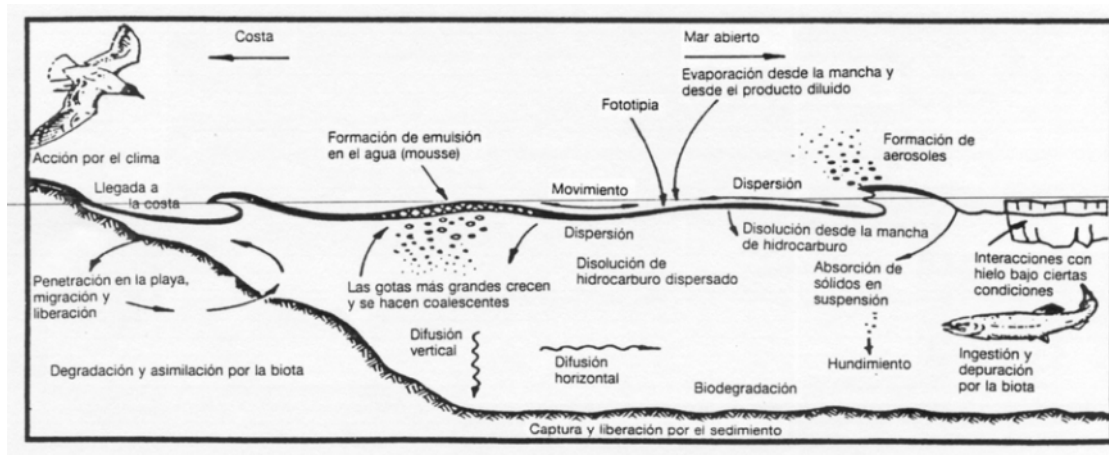


Figura 3-7. Procesos de degradación de hidrocarburos en el mar. Fuente: Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, 1995.

3.3 EFECTOS EN LOS ECOSISTEMAS MARINOS

A principios de los años 50 se hicieron algunas investigaciones para determinar los efectos sobre la pesca y piscifactorías. Entre 1950 y 1960 se estudiaron numerosos vertidos de crudo. Los estudios se empiezan a diferenciar en categorías. Los primeros son los estudios post-accidente (Boesch 1974). Estos esfuerzos sufren de una laguna en la planificación y escasa información de fondo para usar por comparación. Dos de los vertidos más estudiados son el de *Torrey Canyon* y el de *West Falmouth* pues ocurrieron frente a dos importantes centros de investigación: *the marine Biological Association of U.K.* y *the Woods Hole Oceanographic Institution*. Desgraciadamente, escasos seguimientos costeros están cerca de alcanzar la amplia diversidad de científicos y equipo necesario para estudiar correctamente un vertido.

La segunda aproximación al estudio de los efectos biológicos es experimental; se exponen especies seleccionadas a distintas concentraciones de hidrocarburos o dispersantes químicos de limpieza, en laboratorio o experimentos de campo. Se analiza su bio-asimilación y concentraciones letales para tiempos de exposición estándar (48 o 96 h). También se hacen ensayos a largo término usando concentraciones inferiores a la letal, para entender los mecanismos de estrés y su afección en la fisiología, reproducción y comportamiento. Estos efectos son muy importantes, pero en general son más difíciles de estudiar que los efectos letales. Se han fijado limitaciones de concentración por letalidad y por bioasimilación.

La limitación básica de los experimentos es que no resulta fácil extrapolar a respuestas en medio natural. Es particularmente difícil para el caso de petróleo pues sus propiedades físicas no se pueden simular adecuadamente, las especies estudiadas son un subconjunto de las potencialmente afectadas y suelen ser las más fuertes para mantenerlas en laboratorio. La principal limitación de los bio-ensayos de laboratorio es que tienen una escasa reproducción de lo que ocurre en el medio y tan solo reflejan relativas susceptibilidades de diferentes especies o toxicidad de diferentes crudos o dispersantes.

Una mejor aproximación se puede obtener a partir de experimentos de campo, delimitados en zonas intermareales o con barreras artificiales, aunque en este caso los mecanismos físicos no se reproducen fielmente por el efecto barrera. Este tipo de experimentos suele encontrarse con problemas legales por su impacto ambiental.

Muchas publicaciones de los efectos ecológicos de vertidos son más o menos observacionales, es decir, disponen de técnicas simples de estudio de la composición y abundancia de la biota comparado con situaciones de control o de base. El estudio de la persistencia del crudo en la biosfera debe abarcar necesariamente un análisis químico para evaluar sus efectos a largo término con complejas técnicas cromatográficas y espectroscópicas. El análisis de la composición de los hidrocarburos es una parte esencial de la investigación.

No existe una metodología para cuantificar totalmente el daño producido por un vertido ni manera de evaluar el coste económico para su recuperación. Por ejemplo, tras la encalladura del Amoco Cádiz, se inició un proceso judicial ante los tribunales norteamericanos. Trece años después de la catástrofe, el juez dictó sentencia y obligó a la compañía y a los astilleros a indemnizar a los pescadores, ostricultores y ayuntamientos por los gastos de limpieza y restauración, por un total de 1.000 millones de dólares. Aunque no es posible pagar con dinero la destrucción de un ecosistema, las elevadas indemnizaciones pueden inducir a tomar medidas preventivas para evitar accidentes y mejorar los sistemas de limpieza y lastre.

El petróleo puede ensuciar, ahogar o envenenar los organismos dependiendo del grado de contacto, del tipo de hidrocarburo y de la especie. El grado del impacto producido por un vertido es mayor en aquellos organismos que habitan cerca de las zonas donde se produce la mayor concentración, como en la superficie afectando a aves marinas, en el hábitat intermareal y en el fondo debido a la precipitación de los compuestos floculados.

A continuación se analizará el impacto sobre distintas comunidades. Se verá que tan sólo afectando a una especie todo el ecosistema se puede ver seriamente dañado, pues se interrumpe toda la cadena trófica. Se citan las principales fuentes:

- Moore y Dwyer (1974) estudiaron los efectos de los hidrocarburos sobre los organismos marinos.
- Neff y Anderson (1981) analizaron la respuesta de los animales marinos a los hidrocarburos.
- Neff (2002) analizó el efecto bioacumulativo de la contaminación en organismos marinos.
- <http://www.wisegEEK.com/how-do-oil-spills-affect-marine-life.htm>
- http://www.amsa.gov.au/marine_environment_protection/educational_resources_and_information/teachers/the_effects_of_oil_on_wildlife.asp
- <http://www.itopf.com/marine-spills/effects/>
- <http://na.oceana.org/en/our-work/stop-ocean-pollution/oil-pollution/learn-act/effects-of-oil-on-marine-life>
- <http://oceanservice.noaa.gov/facts/oilimpacts.html>
- <http://oils.gpa.unep.org/facts/wildlife.htm>

3.3.1 Aves

Se han observado muchas muertes de aves marinas por el vertido de crudo y fuel pesado. La tasa de mortalidad se ha calculado usualmente contando el número de pájaros dañados en las playas. Pero se ha estimado que tan solo de un 5 a un 15 % de los pájaros muertos alcanzan la orilla. No obstante, eso supuso entre 40 y 100 mil pájaros en el vertido de *Torrey Canyon*.

El primer efecto en los pájaros es la impregnación de las plumas que se pegan con el petróleo, perdiendo su flotabilidad y aislamiento. El pájaro se puede hundir o perder rápidamente su calor corporal y morir de neumonía; para compensarlo aumenta su ritmo metabólico acelerando su hambre. El animal intenta limpiarse ingiriendo petróleo, veneno que hace inflamarse el tubo digestivo y desencadena otros procesos fisiológicos. Los supervivientes no podrán poner huevos o no serán fértiles.

Las especies más afectadas son las buceadoras que, atraídas por la masa flotante, aterrizan en el vertido y pueden sumergirse durante minutos bajo agua sucia. Las especies migratorias suelen viajar concentradas en grandes grupos; si sufren un accidente de este tipo se puede reducir drásticamente su población. En el Cabo de Buena Esperanza, algunas especies de pingüinos han sido extinguidas por vertidos de petroleros.

El proceso de rehabilitación es poco efectivo, debido a que es difícil capturarlos y muchos no sobreviven a los detergentes ni a la recuperación en cautividad. Generalmente no sobreviven ni el 20 % de los tratados.

3.3.2 Mamíferos

Poblaciones de mamíferos marinos han sufrido extinciones locales debidas a descargas rutinarias de petroleros, en especial algunas especies de focas están en peligro de extinción total.

El efecto sobre los mamíferos es mucho menos conocido que en los pájaros, pero no parece tan catastrófico. Comunidades de focas, leones marinos y cetáceos como delfines y ballenas migratorias pueden sufrir alteraciones como sofocaciones, deficiencias del aislamiento de la piel o envenenamiento por peces manchados, sobre todo las crías recién destetadas que no tienen reservas y no pueden alimentarse. Las nutrias marinas se redujeron hasta casi su extinción en la Costa Oeste de EEUU, debido a su caza y a que la contaminación ha destruido su hábitat.

3.3.3 Peces

Se ha comprobado, tanto en experimentos de laboratorio como en accidentes como el de West Falmouth, Puerto Rico, que el petróleo, productos derivados y sus componentes pueden ser muy tóxicos para algunas especies de peces. Sin embargo, muchas especies pueden soportarlo, como en el escape del canal de Santa Barbara, donde los peces de una zona no sufrieron alteraciones. Las escamas y una fina capa de mucus los protege y repele el petróleo. Además, los peces pueden moverse esquivando la zona.

Las larvas de peces y bancos jóvenes, que se concentran en la superficie, se intoxican o quedan atrapados produciendo una mortalidad drástica cuyas consecuencias se detectan a largo término. Sus impactos no son visibles ni fáciles de cuantificar.

También se pueden contaminar indirectamente, por ingestión de invertebrados del fango o del plancton superficial, con concentraciones significantes de hidrocarburos. Algunos peces de la costa frente a una refinería en Australia huelen a keroseno.

En las piscifactorías y cultivos de crustáceos, mejillones, almejas y ostras, los vertidos y la contaminación tienen un gran impacto económico, ya que no se puede vender la producción aunque sobrevivan.

En algunas especies se puede bioacumular persistiendo hasta llegar al consumidor, sobre todo en los tejidos grasos. Las autoridades pueden prohibir su venta en los alrededores durante mucho tiempo. Algunos peces y mariscos pueden acumular hidrocarburos, pero en pocos meses desprenderse de ellos si se mantienen en aguas limpias. Los mecanismos de limpieza son complejos y variados. El tiempo necesario para ello depende de la duración de la exposición, lugares de almacenamiento, metabolismo y estado fisiológico.

3.3.4 Organismos superficiales

El plancton, pequeñas plantas y peces transportados de forma pasiva, también sufren el efecto de los hidrocarburos, pero es mucho más difícil de medir. Experimentos en laboratorio han demostrado que varias especies son muy sensibles a los hidrocarburos, inhibiéndose su crecimiento y fotosíntesis, pero la extrapolación a condiciones naturales es cuestionable. Concentraciones de 60 a 200 ppm pueden inhibir la fotosíntesis hasta un 60 % y ser tóxicas para huevos y larvas de muchos peces como la merluza y el arenque.

Por otro lado se han de valorar los efectos a largo plazo de aceites contaminantes y grumos de alquitrán que son alarmantemente comunes en el mar. Si las concentraciones de hidrocarburos siguen creciendo, el plancton superficial puede sufrir las consecuencias y afectar a la productividad oceánica.

El *neuston* es un conjunto de organismos que viven en la capa superficial del mar. Debido a su contacto directo con los contaminantes, es difícil imaginar que no sufra efectos tóxicos o mecánicos. Se han llevado a cabo algunas investigaciones sobre el impacto de la comunidad de los Sargazos pero, en general, los organismos superficiales están muy poco estudiados.

3.3.5 Organismos intermareales

La zona intermareal es aquel tramo de orilla definido entre la pleamar y bajamar. Su proximidad a poblaciones la hacen especialmente sensible a impactos visuales, y por tanto, se le ha dedicado mayor atención.

Las grandes algas son importantes productores primarios de las costas rocosas. Algunas macroalgas y anémonas tienen una capa natural de mucosidad que las protege, evitando que el petróleo se adhiera a ellas. Aunque suelen ser resistentes al petróleo, pueden ser cubiertas y el petróleo del sustrato pasar a invertebrados

herbívoros matándolos. La falta de depredadores desencadena la colonización de las algas verdes, es la llamada fase verde. Éstas, gradualmente son reemplazadas por una cobertura marrón de algas *fucoïdes* más robustas. Si no son depredadas pueden formar una gruesa capa que impida el restablecimiento de la fauna como mejillones y percebes. En algunas ocasiones, la destrucción de estas algas ha permitido desarrollar una mayor biodiversidad.

La muerte de los animales intermareales se puede producir de muchas maneras. La toxicidad directa parece ser poco usual, pero puede producirse por fuel ligero. Hay efectos indirectos del crudo o fuel pesado que, sin ser tóxicos, resultan letales. Algunas especies móviles como caracoles se retraen en su cáscara, perdiendo su sujeción a las rocas y son transportadas lejos de su hábitat. Los moluscos pueden incrustarse en la roca manchada hasta que no aguantan más y también son transportados. Otras especies móviles se pueden cementar a la roca por hidrocarburos pesados. Otros, como los percebes, pueden ser ahogados por depósitos de petróleo.

En las zonas rocosas, el oleaje limpia rápidamente la zona batida, pero en la parte situada sobre el nivel de pleamar persiste hasta que se erosiona. Los percebes se pueden fijar a superficies asfálticas, pero se ha comprobado que su supervivencia es menor debido a que el sustrato oscuro absorbe más calor, provocando estrés y desecación. Los efectos sobre los hábitats arenosos son menos conocidos. Probablemente debido a la dificultad de tomar muestras y sobre todo a la gran variabilidad de las poblaciones, no se pueden obtener resultados concluyentes. El vertido puede perdurar en la arena o lodo durante años.

Los efectos sobre el hábitat intermareal son de débiles a moderados. Su resistencia y resiliencia se deben a: la fortaleza de estas especies, su rápida reproducción y a la relativa rapidez con la que se regenera la zona. En esta zona pueden ser más perjudiciales los dispersantes empleados en la limpieza que el vertido, por lo que se debe controlar su uso.

3.3.6 Organismos del lecho marino

Los hidrocarburos tienen distinta afinidad por las partículas de sedimento. Preferentemente forman agregados con minerales de la arcilla y turba. Su peso específico los hace precipitar cubriendo el fondo. Una de las técnicas de limpieza consiste en esparcir partículas afines para formar agregados. La precipitación impide que el vertido alcance la costa, eliminando su impacto visual, pero evidentemente desfavorece al hábitat del fondo.

En los accidentes de *Tampico Maru* y *Torrey Canyon* se produjo la muerte masiva de almejas, estrellas de mar, langostas y otros invertebrados de pequeñas cuevas. Sus efectos son arrolladores y lejos de la zona del vertido también se encontraron muchos crustáceos y equinodermos moribundos. La contaminación se puede dispersar por el fondo, arrastrada por las corrientes submarinas, normalmente de aguas someras a profundas. La ausencia de oxígeno en zonas muy profundas ralentiza la degradación de los hidrocarburos.

La persistencia de hidrocarburos en las oquedades y la reducción de los invertebrados herbívoros altera la ecología de la cueva durante años. Diez años después del vertido de Santa Barbara, la biomasa de los organismos es todavía inferior a la que había

antes del accidente. A este descenso pueden haber contribuido la lluvia ácida, otros contaminantes como pesticidas, o variaciones naturales de los niveles de población.

Los procesos de degradación, como la oxidación biológica, reducen de forma selectiva los n-alcenos, de forma que aumenta la concentración de aromáticos y cicloalcanos. Muchos organismos marinos que se alimentan de materia suspendida o sedimentos del fondo pueden bioacumular hidrocarburos en sus tejidos, produciendo efectos crónicos y transmitiéndolos a sus predadores.

3.3.7 Marismas

Las marismas son características en muchos estuarios marinos, desde los pantanos salados dominados por follaje en climas templados a los manglares de árboles en los trópicos. Tienen una gran importancia ecológica, pues son uno de los ambientes más productivos de la tierra. Sirven de hábitat, lugar de reposo, alimentación y apareamiento a gran variedad de pájaros, peces y otras formas de vida.

Son zonas muy resistentes a la contaminación. En el caso de vertidos de hidrocarburos, a menudo tan solo han sufrido daños mínimos, mitigados por la retención en las plantas. Sin embargo, la proximidad a fuentes de contaminación crónica puede tener efectos importantes, llegando a la denudación de la zona. En animales puede ser letal para moluscos, cangrejos, arenques y gaviotas. En plantas, dosis moderadas pueden no tener efectos perjudiciales, pero si se repiten pueden resultar letales, se mueren los retoños y crecen las raíces. El efecto producido depende de:

- La composición de hidrocarburo. Los componentes aromáticos son más tóxicos.
- Época del año. En la estación de crecimiento son mucho más vulnerables.
- Especies afectadas. En contacto directo con algunas plantas, el petróleo puede penetrar a través de las estomas, invadir los espacios intercelulares e impedir la transpiración. Otras, en cambio, desarrollan mecanismos epidérmicos o celulares para impermeabilizarse y se reproducen desarrollando sus raíces.

En algunos casos se ha comprobado que los hidrocarburos inducen el crecimiento de las plantas. Este hecho se puede deber a:

- Un aumento de la retención de agua en el suelo debido al aceite del petróleo.
- La liberación de nutrientes por la muerte de animales.
- Nutrición o regulaciones de crecimiento estimuladas por el petróleo.
- Fijación del Nitrógeno por los microorganismos de la degradación del petróleo.

Los estuarios son zonas confinadas y someras donde se produce poca dispersión. Además, se caracterizan por ser muy turbias. Las partículas en suspensión tienden a absorber el petróleo y precipitar al fondo. El sedimento contaminado puede ser ingerido por detritívoros. Si precipita a fondos con condiciones aerobias, la abundante biota microbiana puede degradarlo rápidamente. En cambio, si cae en zonas con condiciones anaerobias, se almacena durante mucho tiempo.

3.3.8 Regiones polares

Los yacimientos de los casquetes polares y el peligro de la navegación entre icebergs hacen que en estas zonas el riesgo de accidente sea muy alto. Además, sus efectos tienen gran impacto potencial debido a que:

- Las bajas temperaturas impiden la rápida evaporación de los hidrocarburos aromáticos, favoreciendo la disolución de estos compuestos tóxicos, aunque la solubilidad disminuye con la temperatura.
- El índice de degradación bacteriana y otros procesos de eliminación son menos eficientes a bajas temperaturas.
- La biota de las regiones polares es generalmente de vida larga, con bajos potenciales reproductivos, y no tiene una amplia variedad de formas de vida.

3.3.9 Arrecifes de coral

El ecosistema coralino se caracteriza por su gran biodiversidad y productividad. La navegación de petroleros por aguas tropicales de África y Asia ha provocado accidentes en algunos arrecifes. El recubrimiento del coral por hidrocarburos puede dañarlo seriamente; sin embargo, muchas especies se recubren de mucus para protegerse del contacto directo. Por otro lado, la muerte de los pólipos deja un esqueleto coralino que absorbe y retiene el petróleo. La degradación de un vertido es relativamente rápida, pero la recuperación de un arrecife diezmado es extremadamente lenta.

3.4 PREVENCIÓN DE VERTIDOS

Ante los problemas energéticos de la sociedad se debe asumir que:

- La sociedad es cada vez más dependiente de la energía, en un planeta sobre el que se está produciendo un cambio climático, acelerado por efecto del hombre.
- La mayoría de la población vive en zonas vulnerables.
- Todas las fuentes de energía tienen efectos indeseables:
- Los combustibles: los vertidos accidentales o ilegales en su transporte, el efecto invernadero de los gases desprendidos y el deterioro de la calidad del aire. Además de la cantidad limitada de combustible en el planeta. Sin embargo, tiene la ventaja de que se puede producir en el momento y cantidad deseada.
- La energía nuclear: aparentemente es la más inocua pero potencialmente la de mayor afectación tanto en radio de acción y letalidad como en la duración de los efectos. Los reactores se pueden regular parcialmente. Suele ser energía de base
- La eólica: su efecto visual, afección a aves y dependencia del medio, no se puede disponer en todas partes ni en todo momento.
- La hidráulica: la inundación del embalse, la interferencia en el curso de agua, el riesgo de rotura, la dependencia del medio, etc
- La solar: parece ser la más limpia, pero las placas solares tienen una duración limitada y son un residuo especial. También depende del medio y necesita grandes superficies.
- La cogeneración no es más que una combinación de combustión y hidráulica que permite regular la generación y el consumo.

De manera que la prevención y el ahorro son las mejores herramientas para la sostenibilidad

Las medidas de lucha contra la eliminación, según esto, pueden adoptar dos modalidades:

- Medidas preventivas.
- Medidas de eliminación.

Al igual que ocurre con la medicina referida al cuerpo humano, es obvio que el mejor sistema de luchar contra esta patología de los océanos es la adopción de medidas preventivas, que eviten que la enfermedad aparezca o que al menos revista proporciones reducidas y, por lo tanto, controlables. Además, se ha comprobado que los costes de los sistemas preventivos son muy inferiores a los paliativos. Con ello se lograría una doble ventaja económica; por un lado los costes de limpieza de la contaminación serían más pequeños y, por otro, el coste indirecto de los daños causados en el medio también sería menor.

La prevención de la contaminación procedente de los buques se centra principalmente en acciones que tiendan a eliminar las causas de vertidos, tanto los operacionales (limpieza de tanques, carga-descarga, etc.) como los accidentales (colisiones, explosiones, etc.).

Por otro lado, se ha desarrollado numerosa normativa internacional al respecto.

- Convenio de Londres 1972 sobre la prevención de la contaminación del mar por vertimiento de desechos y otras materias. Para la prevención de la contaminación causada por vertido de material de dragado, hundimiento de buques, etc.
- MARPOL 73/78 Convenio para prevenir la contaminación por los buques. Normas para evitar las descargas de sustancias contaminantes operacionales y accidentales de los buques.

Anexo I.- Hidrocarburos.

Anexo II.- Sustancias nocivas líquidas transportadas a granel.

Anexo III.- Sustancias perjudiciales en paquetes, contenedores, tanques portátiles y camiones cisterna.

Anexo IV.- Aguas Sucias.

Anexo V.- Basuras.

Anexo VI.- Contaminación atmosférica.

- SOLAS 74/78. Convenio Internacional para la seguridad de la vida humana en el mar. Normas sobre diseño, prescripciones contra incendios, elementos de salvamento, comunicaciones, sistemas de propulsión y gobierno, cargas, etc.
- Convenio de Barcelona 1976 para la protección del medio marino y de la zona costera del Mediterráneo. Para la prevención y lucha contra la contaminación de cualquier fuente en el Mediterráneo.
- OPRC 90. Convenio sobre Cooperación, Preparación y Lucha contra la Contaminación por Hidrocarburos. Cooperación internacional, notificación y planes de preparación y lucha contra la contaminación.
- Convenio de París 1992. Convenio para la protección del Medio Ambiente Marino del Atlántico Nordeste. Para prevenir la contaminación causada por vertidos o incineración, por fuentes mar adentro, de origen terrestre y otros orígenes.

- Directiva de la UE sobre Instalaciones de recepción. Para la provisión adecuada de instalaciones de recogida y tratamiento de residuos generados por los buques, en los puertos de la Comunidad Europea.

Legislación Nacional

- Orden 10.6.83. Normas complementarias al Convenio SOLAS 74/78. Aplicación a buques de recreo y de pesca.
- R.D, 145/89. Sobre admisión, manipulación y almacenamiento de mercancías peligrosas en los puertos.
- R.D. 438/94. Regula las instalaciones de recepción de residuos oleosos procedentes de buques.
- R.D. 253/2004 medidas de prevención y lucha contra la contaminación en las operaciones de carga, descarga y manipulación de hidrocarburos en el ámbito marítimo y portuario.
- R.D. 800/2011, de 10 de junio, por el que se regula la investigación de los accidentes e incidentes marítimos y la Comisión permanente de investigación de accidentes e incidentes marítimos.

Así mismo se han creado numerosos foros y grupos de trabajo como por ejemplo PROTECMA. <http://www.ptprotecma.es> que tiene como origen la Red Tecnológica para la Prevención y Respuesta a los Vertidos Marinos "PREVECMA", creada en el año 2006 y promovida por el Ministerio de Ciencia e Innovación para promover en España la investigación y el desarrollo tecnológico para la prevención, respuesta y minimización del impacto medioambiental y socioeconómico causado por los vertidos de hidrocarburos y de otros productos potencialmente peligrosos transportados por el mar.

3.4.1 Construcción de los barcos petroleros.

Las tendencias modernas de la construcción de buques pueden contribuir notablemente a disminuir el riesgo de contaminación. Las medidas más representativas son:

División de la carga en compartimentos estancos. Se impone un tamaño máximo (30.000-40.000 m³) a los diversos tanques de cada buque, de forma que en caso de rotura parcial del casco no se derrame todo el volumen transportado. Esta regla tiene como consecuencia un aumento del coste de la construcción y de la cantidad de acero.

Construcción de un doble casco, con un doble objetivo: proteger los tanques de impactos exteriores y disponer de tanques de lastre independientes de los de carga. El doble casco encarece entre un 30 y 40 % el coste de construcción del buque, debido a la necesidad de más material y al coste de explotación, pues requiere motores más potentes para mantener idénticas velocidades.

Separación total de la carga y lastre mediante tanques independientes, sin que se puedan admitir utilidades mixtas, separadas o simultáneas, en ninguno de ellos. Esto reduce la capacidad de transporte, ya que el lastre puede llegar a ser el 60 % del peso del buque pero es el buque menos contaminante.

3.4.2 Métodos operativos en los buques

Los problemas de vertido y limpieza de los residuos generados por la operación de carga y descarga pueden ser tratados de diversas formas. Si bien, en la mayoría de los casos, el producto resultante se termina evacuando al mar, ya que no en todos los puertos existen instalaciones específicas para su tratamiento y los que disponen de ellas cobran por su recogida. Por ello, conviene almacenar estos residuos tan concentrados como sea posible.

Uso del sistema de limpieza de tanques para separar el agua de mar como el método LOT, decantadores químicos, membranas flexibles, etc. El sistema LOT (Load On Top) consiste en almacenar el agua con los restos de petróleo. Cuando se vacía un tanque se lava con agua caliente a presión y el agua sucia se almacena en un tanque especial. Después, se llena de agua para lastrar el barco pues las paredes no están dimensionadas para soportar la presión. Para volver a cargar se vierte el agua de lastre hasta que empiezan a aparecer residuos que se envía al tanque de almacenamiento. En este tanque se van separando y es posible verter parte del agua. Los residuos concentrados que se descargan en una terminal especial. Si el tanque de almacenamiento no está lleno se puede cargar encima, de ahí su nombre. En las operaciones de carga, descarga y transbordo del material es conveniente el uso de cortinas o paneles que cubran el recorrido del material y faciliten el vertido del mismo por las escotillas.

3.4.3 Seguridad en la Navegación.

La importancia de la prevención de los accidentes durante el periodo de navegación estriba en que los resultados suelen ser catastróficos, y por tanto, las cantidades de contaminante vertidas muy elevadas. Las medidas en este aspecto pueden resumirse en:

- Procurar una buena distribución de la carga entre los tanques para evitar el riesgo de rotura por fatiga de la estructura del casco o el peligro de explosión por llenado excesivo. Para lograr la óptima distribución debe realizarse una previsión de las cargas y descargas sucesivas, así como la automatización del sistema de control de carga. Para optimizar la distribución de la carga es necesaria una racionalización, una previsión de los diversos episodios de carga-descarga y una automatización de los sistemas de control de carga.
- Establecer pasos de navegación con sentidos diferenciados que eviten choques entre barcos, sobretudo en zonas de alta densidad de tráfico como estrechos (Canal de la Mancha, Gibraltar, Malaca), cabos (Buena Esperanza, Finisterre), algunos ríos (Elba, Rin, Mississipi) y en general entornos de los grandes puertos (Nueva York, Rotterdam, Barcelona), y para evitar encalladuras en obstáculos como escollos.
- Mejora del sistema de localización y maniobra para una completa y constante identificación de la situación del buque y de los que le rodean. Los sistemas de mayor uso son los de radio señales en zonas costeras y la navegación por satélite con GPS. Es necesario conocer la posición exacta del barco y de los buques que lo rodean. Paralelamente se han desarrollado diversos sistemas Anti-Colisión para anular los errores humanos en momentos críticos, ofreciendo rutas óptimas, datos sobre distancias relativas y definiendo las maniobras necesarias para evitar el impacto.

3.5 CONTROL DE VERTIDOS

La contaminación por hidrocarburos se produce normalmente de forma súbita, debido a una emisión puntual y se dispersan por la superficie. Las técnicas de percepción remota son las únicas eficaces debido al gran dominio que debe abarcarse. Las dos más usadas para detectar y seguir las manchas de petróleo son el radar y la fotografía en diversas bandas de longitud de onda.

El coste de estas técnicas es elevado, pero la gravedad del problema justifica el uso de estas técnicas no convencionales. La detección remota se ha demostrado que es efectiva para el control de actividades relacionadas con vertidos, tanto para comprobar violaciones de las normas, como para su estudio y para facilitar las tareas de limpieza (se estima que puede llegar a ahorrar entre un 15 y 20 % de los costes de limpieza).

Además proporcionan otras ventajas como la posibilidad de adquirir datos de alta fiabilidad a intervalos regulares de tiempo o de forma continua. En particular, la radiación infrarroja o la luz visible sirve para obtener información de la calidad del agua (Gerani et al. 2001). Estudiando la alteración de la intensidad y color de la radiación luminosa al pasar por el agua, se puede deducir la naturaleza y concentración de los elementos que contiene. El sistema de análisis de temperatura también ha servido para buscar supervivientes de barcos naufragados.

3.5.1 Control por sensores ópticos

Las técnicas ópticas permiten la detección selectiva y la medida de la radiación en las distintas bandas del espectro electromagnético, desde la gama ultravioleta (entre 0.3 μm y 0.4 μm) hasta los infrarrojos (de 0.7 μm a 8 μm). Los sensores utilizados son los sistemas de fotografía, televisión, *scanning*, láser y microondas. Estos sensores pueden instalarse en plataformas especiales espaciales, aéreas, navales y en plataformas fijas. Existen numerosos satélites de la Agencia Espacial Europea con imágenes disponibles. Los datos obtenidos se almacenan como imágenes que mediante un análisis digital, pueden dar información de distintos fenómenos.

Los ultravioletas se basan en la distinta capacidad de reflexión de las radiaciones ultravioletas del espectro de luz por parte del agua y del hidrocarburo. Esta diferencia produce cambios de coloración de las ópticas o una diferencia de la tensión del detector electrónico. Este sistema es capaz de detectar películas de hidrocarburos de hasta 0.15 μm .

En cambio, el uso de radiaciones infrarrojas o microondas basa su efectividad en las radiaciones características de la temperatura de los cuerpos que se reflejan. Un sensor de infrarrojo térmico detecta diferencias de temperatura en un cuerpo de agua y en sus distintas zonas. Como el petróleo tiene una temperatura inferior al agua, se detecta una mancha oscura más intensa en las zonas más concentradas. La diferencia entre la temperatura radiométrica del agua cubierta por una película de hidrocarburo de unos 10 μm es de aproximadamente 1,4 °C. Este método puede utilizarse durante la noche, pues sólo depende de la temperatura. Los sistemas FLIR (*Forward Looking Infrared*) son sistemas pasivos que pueden ser visualizadas en tiempo real en una pantalla de televisión.

3.5.2 Control por radar

El radar registra las variaciones de amplitud en la agitación del mar causadas por la mancha de petróleo. El sistema SAR (*Synthetic Aperture Radar*) registra ondas que se reflejan mejor en el agua que en el hidrocarburo, produciendo una mancha oscura en una pantalla.

La técnica ha sido desarrollada por el laboratorio de Investigaciones Navales de los Estados Unidos. Este sistema es efectivo en condiciones meteorológicas adversas y abarca zonas extensas. El inconveniente que presenta es la identificación de la causa del cambio de la rugosidad de la superficie libre, que se puede tratar de hidrocarburo o bien puede ser debida al plancton, a zonas de surgencia de agua profunda o a viento local. Por ello su rango de aplicación se limita a viento de 3 a 10 m/s. El ciclo de 35 días del ESR-1 SAR asegura el cubrimiento de cualquier localización en Europa unas seis veces por mes, y ha demostrado ser una herramienta útil para la monitorización de vertidos, no solo porque no se ve afectado por la nubosidad, sino también por la rápida disponibilidad de los datos. Una red de estaciones terrestres a través de Europa puede recibir los datos de las imágenes listas para usar sólo unas pocas horas después de su adquisición.

Estos datos son importantes para valorar la extensión de la dispersión y dirigir las operaciones de limpieza y los aviones o aeroplanos que patrullan. El control indirecto por imágenes SAR se ha demostrado eficaz según los trabajos de Gade et al. (2006) y Redondo y Platonov (2009) y Tarquis et al. (2011). (documento adjunto como anexo 3).

3.6 TÉCNICAS DE ELIMINACIÓN

Las técnicas de limpieza de vertidos accidentales intentan eliminar la mancha de petróleo de forma artificial, o bien, simplemente evitar que se extienda o llegue a la costa confiando en la depuración natural por las bacterias y la agitación marina.

3.6.1 Limitación de la Mancha

Se trata de evitar que se disperse, procurando que quede concentrada en la menor superficie posible. Se produce mediante tres procedimientos básicos:

- Transporte del hidrocarburo en los tanques en forma de gel para evitar que se disperse en el mar si hay un accidente.
- Gelificar la periferia de una eventual mancha en caso de que se produjera.
- Adicionar ácidos grasos en la mancha, de forma que se aumente la viscosidad eliminando las fuerzas de dispersión y mitigando las de retracción.
- Confinamiento con una barrera física: superficiales, como las cortinas rígidas, semiflexibles y flexibles, y las profundas o neumáticas.

Las cortinas superficiales deben tener una parte emergida, para evitar que con el oleaje y el viento rebase el hidrocarburo y una parte sumergida, por lo que deben lastrarse. Para una buena retención la zona sumergida ha de ser unas cuatro veces la emergida.

Las barreras neumáticas consisten en un tubo agujereado colocado en el fondo, que insufla aire, creando una cortina de burbujas que ascienden. Estas barreras no suponen ningún obstáculo para la navegación, pero tienen el inconveniente de ser muy afectadas por el viento y las corrientes. Se suelen usar como método preventivo en las descargas.

3.6.2 Bombeo

Una vez confinado, hay que extraer el petróleo. En ocasiones las propias barreras físicas disponen de conductos de succión o son de materiales absorbentes. Hay medios mecánicos basados en la diferencia de densidad para aspirar el petróleo por bomba (skimmers, como el ejemplo de la figura 3.8). También hay barcos y pontonas que disponen de un sistema de recogida de petróleo y decantadores en el propio barco para separarlo del agua.

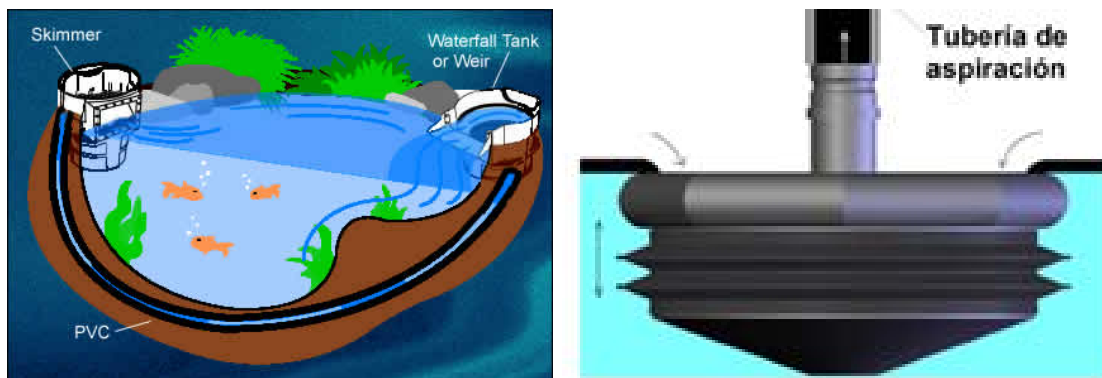


Figura 3-8. Esquema de contención y eliminación con skimmer.

3.6.3 Absorción

Consiste en extraer el petróleo mediante materiales a los que se absorbe fácilmente, como geotextiles de polivinilos, poliuretano y otros materiales hidrófobos o como sepiolita o arcillas expandidas que se echan a la mancha y cuando han empapado la máxima cantidad posible se recogen y destruyen. Tienen un rendimiento de entre 40 y 180 litros por minuto. Pueden ser de absorción discontinua como granulados, esponjas y trapos o continuos como rollos y barreras. En la figura 3.9 se pueden observar algunos ejemplos.



Figura 3-9. Muestras de absorbentes.

3.6.4 Biodegradación acelerada

La biodegradación del petróleo es un proceso natural que consiste en la transformación de los hidrocarburos en compuestos más solubles e inestables, que a su vez serán atacados por otros microorganismos transformándolos en compuestos más simples hasta conseguir su mineralización en CO_2 y H_2O .

El principal reto es acelerar la actividad microbiana para reducir los tiempos de degradación. Los organismos capaces de asimilar son escasos, no suelen ser especies dominantes en el medio y son muy vulnerables a éste. Las bajas temperaturas ralentizan el metabolismo, la salinidad reduce la permeabilidad de las membranas de las bacterias, la concentración de oxígeno ha de ser mínima para que se produzcan las reacciones, la presencia de componentes volátiles del petróleo inhiben a los microorganismos y la presencia de nutrientes como carbono, nitrógeno y fósforo limita el crecimiento bacteriano. La opción más segura es aprovechar la flora autóctona y estimular su actividad con la adición de nutrientes. Los nutrientes de aporte para favorecer el crecimiento deben ser compuestos de nitrato y fósforo que sean baratos, estables, no tóxicos y oleofílicos, es decir, sustancias que sean atraídas por los hidrocarburos para que se queden en la interfase agua-petróleo donde se van a desarrollar las bacterias.

El cultivo de bacterias consumidoras de hidrocarburos puede ser conveniente si la población de éstas es escasa. Los cultivos resultan efectivos en el lavado de tanques; sin embargo, al verterlos al mar se encuentran en un medio hostil y se puede producir un rechazo. Las bacterias más usadas son: *Arthrobarter*, *Micrococcus*, *Acinetobarter*, *Mycobacterium*, *Brevibacterium*, *Pseudomonas*, *Nocardia*, *Vidrio*, *Flavobacterium*, *Corynebacterium*, etc. También se usan levaduras como la *Candida* o la *Rhodotorula*, mohos como el *Sporobolomyces* o el *Cladosporium* y algas como la *Protheca hydrocarborea*.

En el puerto de Vilanova y la Geltrú, en abril de 2004, se hizo un experimento en una dársena confinada con una barrera con unos 140 m^2 . Se vertió una mancha de $3,5 \text{ l}$ de gas-oil, una contaminación equivalente a 250 l/ha , sobre la que se dispersó un cultivo a base de 400 g de Putidoil (nombre comercial de la bacteria *Pseudomona putida-36*) mezclados con aproximadamente 180 litros de agua de la dársena con nutrientes (N i P), y se dejaron en fermentación durante 6 h (Figueras y Anxo 2004).

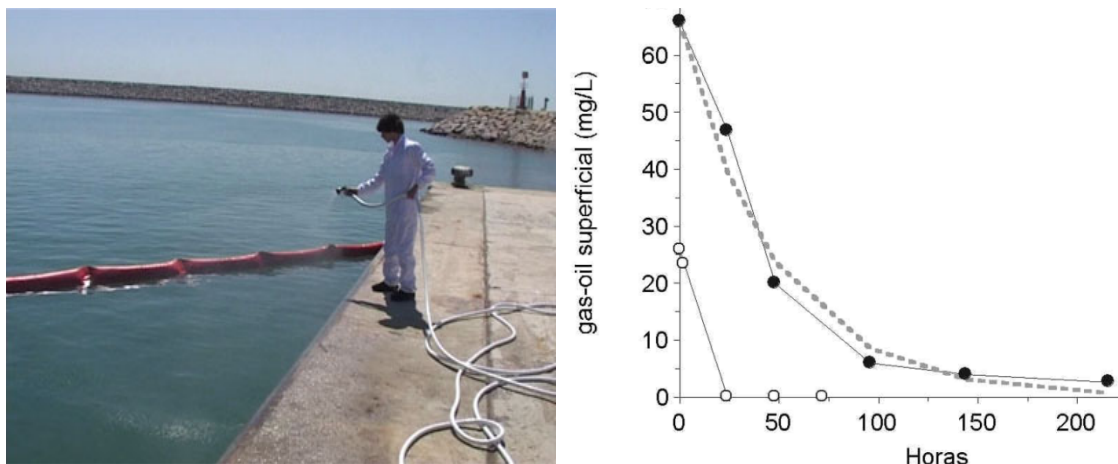


Figura 3-10. Prueba de biorremediación en Vilanova. Figueras y Anxo 2004

Se tomaron analíticas de calidad de aguas a unas horas, 24h, 48h y 72h en la zona tratada y otra sin tratar. Las muestras extraídas de la zona no tratada permiten observar el comportamiento de la degradación natural, rápida inicialmente, por la evaporación lenta de los elementos volátiles y ligeros tras las 24 h. En concreto, la prueba realizada muestra como con bacterias a las 24h no se detectan rastros de hidrocarburos, mientras que en el proceso natural no se alcanza este nivel ni a los 9 días. El tratamiento aplicado divide por un factor 4.5 el tiempo necesario para la desaparición del 90% del vertido.

Otros experimentos, como los de Perez Silva et al. (2003) con cepa *Pseudomonas aeruginosa* AT18 en la degradación de naftaleno, demostraron que tiene una actividad biodegradativa del 10 %. La adición de glucosa (2 %) incrementó la biodegradación en un 22 %. Produce 1,35 g/l de ramnolípidos en presencia de naftaleno y hasta 6,15 g/l en presencia de naftaleno más glucosa.

Normalmente al acabarse el hidrocarburo y no poderse alimentar las bacterias mueren, pero hay que tener cuidado con la introducción de nuevas especies en el hábitat y los posibles efectos secundarios que pueden ejercer sobre otras especies. Las bacterias se han demostrado útiles para limpiar pequeñas manchas, especialmente en materiales porosos o zonas confinadas. Sin embargo, para grandes manchas este método resulta difícil de aplicar.

3.6.5 Adsorción

Ultimamente los productos oleofílicos son los más utilizados, como el oilgoneasy <http://www.oilgoneeasy.com/es> El producto oleofílico (de fuerte afinidad al crudo en lugar del agua) se adhiere a los hidrocarburos y permanece allí a pesar de la lluvia, el viento o las mareas. Crea una micro-emulsión para facilitar el acceso de las bacterias endógenas a los contaminantes. La capa exterior actúa como catalizador para la degradación de hidrocarburos, así que los microorganismos empiezan a aumentar en número.

A diferencia de los fertilizantes regulares, el producto no sirve como alimento para organismos no degradadores de hidrocarburos; por lo tanto, sólo hay crecimiento de los

microorganismos si hay que descontaminar el sitio. Una vez que la capa exterior se divide por la bacteria endógena, el resultado es la rápida degradación de hidrocarburos, una microemulsión de hidrocarburos y la cantidad exacta de nitrógeno y fósforo que requiera el contaminante.

Este producto es recomendado por las autoridades para la limpieza en el Golfo de México en 2010: <http://www.epa.gov/emergencies/content/ncp/products/s200.htm>].

3.6.6 Precipitación

Esta técnica consiste en espolvorear la mancha de petróleo con partículas de un material de alta densidad como arena, caolín o cenizas, de forma que se adhieran al petróleo formando un grumo que precipite al fondo. Para una mayor efectividad, la superficie específica de las partículas debe de ser la mayor posible. Este sistema no soluciona el problema sino que lo cambia de sitio, de la superficie al fondo, por lo que sólo se debe recurrir a él en última instancia.

3.6.7 Combustión

Consiste en quemar la mancha, pero se ha visto que no es un método eficaz, pues las fracciones más combustibles son las volátiles, que por si solas desaparecen. Por otro lado, el agua actúa de refrigerante, dificultando la inflamación. Para facilitararlo se vierten sustancias absorbentes o productos inflamables que hagan de catalizadores del proceso. La combustión tiene efectos ecológicos muy desfavorables, por lo que su aplicación no es recomendable.

3.7 EFECTOS DE LAS TÉCNICAS DE LIMPIEZA

Según la publicación de Chapman et al. (2007) se ha comprobado que algunas de las técnicas de limpieza a base de dispersantes son ineficaces e incluso pueden resultar más perjudiciales que el propio vertido.

Desde el punto de vista ecológico, lo más deseable es el confinamiento y absorción de la mancha sin añadir ninguna sustancia ajena al medio. Desgraciadamente, el confinamiento de la mancha sólo es posible poco después del accidente, mientras sea relativamente pequeña, y los métodos de recogida sólo son eficientes en condiciones de mar en calma.

El empleo de sustancias absorbentes como paja dio muy buenos resultados en los accidentes de Santa Bárbara y San Francisco en manchas flotantes. Sin embargo, en la zona intermareal, los restos secos de paja y petróleo son más persistentes que el petróleo solo. El musgo de turba fue muy efectivo en la limpieza de las orillas afectadas en la Bahía de Chedabucto.

El uso de absorbentes sintéticos a base de microfibras de polipropileno oleofílicos está creciendo, pero nos enfrenta al problema de la persistencia de materiales no biodegradables, que una vez usados deben gestionarse como residuo especial.

La precipitación del petróleo con cal o arena es, en cuanto a impacto ecológico, poco deseable. Si bien puede proteger la zona intermareal, la deposición queda acumulada en el sedimento sobre una gran zona del fondo. En medios costeros o estuarios, donde hay una productiva comunidad bentónica, puede afectar seriamente a la pesca y las piscifactorías.

La combustión es biológicamente inocua, pero presenta dificultades en caso de manchas muy grandes y a menudo requiere aditivos oxidantes o mechas. Es una técnica para manchas pequeñas y aguas cálidas.

Los agentes dispersantes son soluciones que rompen los hidrocarburos en cadenas más cortas formando una emulsión con el agua. El daño biológico producido por una aplicación masiva de dispersantes fue devastador en el vertido del Torrey Canyon. En experimentos de laboratorio, se demostró que la combinación de detergentes y petróleo era más tóxica que cada componente por separado.

Posteriormente, se buscaron dispersantes menos tóxicos como el Corexit y el BP 1100, pero en combinación con petróleo dan productos tóxicos. La emulsificación del petróleo aumenta la cantidad de componentes tóxicos en solución que se dispersan a través del medio. Sin embargo, pueden darse casos en que puedan usarse para limpiar colonias de pájaros o mamíferos. Por ejemplo, en los planes de contingencia desarrollados por Gran Bretaña, se marcan unas épocas del año y zonas adyacentes a colonias importantes o dañadas en las que pueden emplearse. También está permitido, bajo estricto control y supervisión, en casos de riesgo de incendio u otros peligros importantes.

En Inglaterra y California se limpió la orilla con vapor. Éste, virtualmente exterminó la vida intermareal haciendo más daño que beneficio.

En playas de arena se puede rascar la capa manchada y tratar la en depósitos separadores. Aunque se producen daños a corto plazo, se pueden compensar por la eliminación de potencial contaminación persistente.

Los ecologistas parecen estar de acuerdo en que la evacuación física con absorbentes es la única técnica no destructiva para la limpieza de las orillas rocosas y que los dispersantes o el vapor no deben usarse. También los adsorbentes han dado buenos resultados y han sido los más empleados en los últimos vertidos.

3.8 TIPOS DE VERTIDOS

En función de los efectos los vertidos se pueden agrupar en tres clases:

- Aquellos relacionados con el largo tiempo de recuperación de un ecosistema contaminado.
- Aquellos debidos a contaminación continua, crónica o frecuente.
- Los de gran persistencia de la contaminación en el ecosistema.

3.8.1 Vertido puntual

Hay distintos grados o fases de recuperación del ecosistema contaminado. En Santa Barbara, la colonización de una costa rocosa comenzó prácticamente al mes, cuando

la biota intermareal se recuperó excepto en algunas áreas donde precipitaron depósitos asfálticos. Sin embargo, la fauna de la orilla rocosa tardó un año en recuperarse y mucho más en hábitats como la zona bentónica y las marismas, pues la sucesión biológica es lenta.

En comunidades naturales, una especie puede hacer excluir o limitar otras por competición o depredación. Si la especie dominante es eliminada o reducida bajo cierto umbral, las especies inferiores disponen de un resguardo seguro en una supervivencia atípica y pueden resistir otras presiones bióticas. Un ejemplo familiar de este fenómeno es el modelo de desarrollo de los bosques; los árboles de madera dura representan el clímax de la comunidad. Si un fuego arrasa el bosque, se repuebla con hierba y pinos. Ambos necesitan mucha luz y no pueden crecer bajo la capa de humus, de forma que gradualmente dejan lugar a árboles más duros.

En las comunidades marinas la sucesión es generalmente más rápida, aún así puede durar varios años. En las costas rocosas inglesas hay una comunidad de almejas, mejillones, lapas, algas y predadores de algas en equilibrio. Los predadores de algas controlan su crecimiento restringiendo la superficie de roca. Tras el vertido de crudo y limpieza de Cornualles todas las lapas murieron. En dos o tres meses empezaron a aparecer pegadas a unas algas verdes poco comunes. En el año siguiente, el vigoroso crecimiento de la capa vegetal característico reemplazó la fase verde. Pequeñas lapas empezaron a reaparecer pero no podían acabar con las grandes algas, de forma que el denso manto persistió durante tres o cuatro años.

Cuando los organismos de una zona han sido muy devastados pero el petróleo no persiste en el ecosistema, la recuperación biótica por sucesión de especies puede ser un proceso lento, sobretodo en comunidades altamente estructuradas. El tiempo necesario para la recuperación del clímax de una comunidad contaminada varía desde unas semanas o meses hasta una década. La duración dependerá tanto de la complejidad estructural de la comunidad como del grado de daños iniciales.

3.8.2 Contaminación crónica

El gran crecimiento de la cantidad de petróleo en alta mar ha llegado al grado de contaminación crónica. Las zonas cercanas a refinerías, plantas petroquímicas, estaciones portuarias y otros tipos de descargas están expuestas a contaminación crónica, continua o frecuente, por las operaciones habituales y suponen una contaminación de 10 a 100 ppm diaria.

Redondo y Platonov (2009) estudiaron los vertidos detectados por la vigilancia por Imágenes SAR de ERS-1 / 2 del proyecto Clean Seas y analizó la persistencia de una mancha según su tamaño y obtuvo una buena correlación que cumple la Ley de Zipp como se puede ver en la figura 3.11. El porcentaje de los derrames detectados de pequeño tamaño, hasta 100 km², es de aproximadamente 38%. En la franja media no se dispone de datos ya que estaba fuera del rango del proyecto, pero según esta extrapolación la previsión de vertidos de 500 km² es de 80, lo que correspondería a un gran accidente de 40.000km². Por ello, los pequeños y medios vertidos deben tenerse en cuenta, ya que producen una contaminación equivalente a los grandes accidentes.

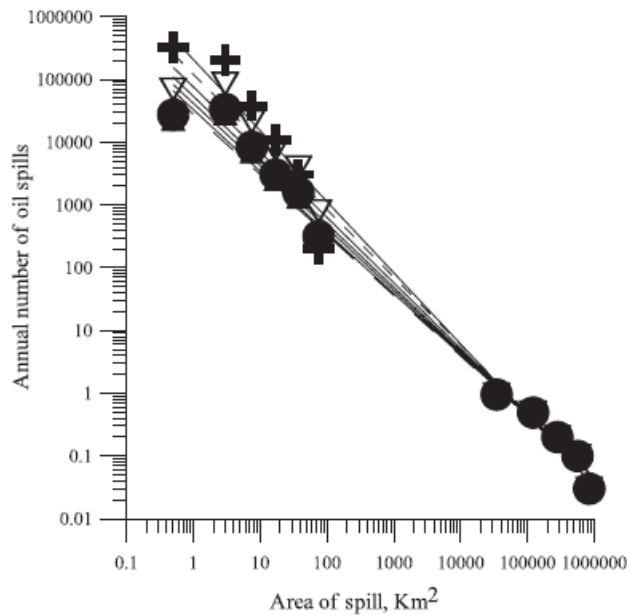


Figura 3-11. Relación de número de vertidos y su tamaño. Redondo y Platonov 2009

La persistencia y dispersión de los depósitos contaminados del fondo de West Falmouth, Santa Bárbara y Chedabucto Bay indica que el petróleo de un único derrame puede retrasar la recuperación debido a la toxicidad continua o a la saturación y re-contaminación de una comunidad recuperada. La persistencia o frecuencia de la contaminación interrumpe repetidamente la sucesión de comunidades, por lo que puede mantener una comunidad inmadura y con escasa diversidad.

Los efluentes de las refinerías pueden producir un considerable impacto en masas de agua confinada donde la dispersión del vertido es lenta. La elevada concentración favorece la oxidación biológica del hidrocarburo, produciendo un déficit de oxígeno en el fondo y las condiciones anóxicas son letales para gran cantidad de especies. Por ejemplo, el hábitat sedimentario del puerto de Los Angeles fue devastado por este proceso. En cambio, en aguas abiertas, el efecto se extiende sobre un radio de cientos de metros pero con baja concentración y, por tanto, menores efectos. Los animales nadadores pueden migrar a zonas mejores.

Estudios del hábitat en el canal de Houston (Texas) indican un gran descenso de la diversidad de especies. Sin embargo, no se puede establecer que sea la única causa, ya que puede deberse a otras fuentes de contaminación o al cambio de las condiciones de salinidad, pH o temperatura. Los efectos del petróleo en el plancton, las larvas y las comunidades neustónicas no están bien definidos, pero parece que incluso a muy bajas concentraciones puede afectar a la fotosíntesis. Muchos ecosistemas de la costa se caracterizan por un descenso de la diversidad de especies y grandes fluctuaciones diarias de la concentración de oxígeno disuelto, alcanzando condiciones cuasi-anaerobias cerca del fondo. Bajo algunas condiciones, los materiales de alta toxicidad inhiben la respiración y la fotosíntesis; en cambio, bajo otras condiciones, la descomposición de los residuos y el vertido de nutrientes estimulan el metabolismo.

3.8.3 Contaminantes persistentes

Hay indicios de una amplia contaminación marina por hidrocarburos en casi todos los océanos en mayor o menor grado. La dispersión rebaja los niveles a muy bajas concentraciones, pero la persistencia de estos compuestos en el medio y en los organismos debe considerarse en un análisis a largo plazo. Se puede detectar por sus efectos en el medio, peces de alta mar, sargazos, materia en suspensión y en la capa superficial.

El petróleo, incluso a muy bajas concentraciones, tiene un hedor que afecta a los sentidos de los organismos marinos, alterando su comportamiento. Concentraciones de crudo disuelto del orden de 20 a 40 ppm provocan modificaciones en la conducta alimenticia de las gambas. Concentraciones todavía menores, de 1 a 4 ppm afectan los sentidos de localización del alimento a los gusanos de mar.

La contaminación persistente o relicta puede tener serias consecuencias. Efectos de bajo nivel o impacto pueden ser graves, por ejemplo disfunciones de la respiración, fotosíntesis u otras funciones metabólicas; perturbaciones del comportamiento normal asociado a la alimentación, aprendizaje, desarrollo o reproducción; posibles efectos cancerosos o mutagénicos; etc.

Se ha suscitado una gran alarma por los efectos cancerígenos que puede provocar la ingestión de pescado contaminado. Los compuestos del petróleo y de los productos refinados contienen conocidos componentes cancerosos, principalmente aromáticos policíclicos, en pequeñas proporciones. Aunque estas cantidades sean pequeñas, deben evitarse debido al riesgo que suponen.

4 DISPERSIÓN COSTERA Y TURBULENCIA

A continuación se hace una revisión teórica sobre los fenómenos de la difusión y la dispersión, para analizar las distintas formulaciones y agentes que intervienen en la deformación y desplazamiento de una mancha.

4.1 CONCEPTOS BÁSICOS

4.1.1 Flujo viscoso

Se entiende por material viscoso aquel que se deforma irreversiblemente bajo la acción de esfuerzos. Así, las tensiones de corte por unidad de superficie son proporcionales al gradiente de velocidades perpendicular (v) a esta superficie, cuya constante de proporcionalidad es la **viscosidad cinemática** (μ) dinámica ($\eta = \mu\rho$)

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{\partial v}{\partial Z} \quad \text{Ec. 4-1}$$

4.1.2 Conservación de masa

Si los cambios de flujo de una cantidad escalar en dirección x se consideran desde un punto de vista conservativo, la variación volumétrica del escalar es la divergencia del flujo en esa dirección. Entonces la ecuación de Fick queda de la siguiente forma:

$$\frac{dc}{dt} = -\frac{d}{dx} Fc = -\frac{d}{dx} \left(-D \frac{d}{dx}\right) = D \frac{d^2c}{dx^2} \quad \text{Ec. 4-2}$$

Si el flujo es incompresible entonces:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \text{Ec. 4-3}$$

4.1.3 Ecuaciones de Navier-Stokes

La conservación de la cantidad de movimiento, la segunda ley de Newton, establece que la suma de fuerzas (de masa, tensiones de corte y presión) que actúan en una partícula es igual a su masa por su aceleración.

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla) u \right) = -\nabla p + \rho g + \mu \nabla^2 u \quad \text{Ec. 4-4}$$

Para flujo incompresible, desarrollando en derivadas parciales las ecuaciones anteriores, se llega a las ecuaciones de Navier-Stokes que definen la hidrodinámica básica.

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right)$$

Ec. 4-5

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial(p + \rho g z)}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$

4.1.4 Vorticidad

Debido a la viscosidad, si la diferencia de velocidades entre capas es grande, al deslizar unas sobre otras, las fuerzas viscosas obligan a girar sobre sí mismas a las superficies de contacto, produciendo así remolinos. Debido a ello existe una mayor pérdida de carga por viscosidad, pues se absorbe energía para formar el remolino. Para su análisis, se expresan las ecuaciones de la dinámica de fluidos mediante el rotacional de la velocidad, conocido como vorticidad.

$$\vec{\omega} = \nabla \times \vec{u} = \text{rot } \vec{u} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ u_x & u_y & u_z \end{vmatrix}$$

Ec. 4-6

Aplicando el operador rotacional a las ecuaciones de Navier-Stokes se eliminan los términos de presión, ya que el rotacional de un gradiente es nulo.

En la superficie del océano, donde se puede considerar la turbulencia a media y gran escala como bidimensional, la ecuación de la vorticidad, se puede definir a partir de la función de corriente y es el laplaciano de la función de corriente.

4.1.5 Flujo turbulento

La relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas de viscosidad en un flujo es lo que determinara su carácter laminar o turbulento. Existen varias definiciones clásicas sobre la turbulencia (Hinze 1975; Batchelor 1967 y 1982; Lesieur 1997). En general, se dice que un flujo es laminar cuando sus líneas de corriente son paralelas y es turbulento cuando sus rasgos fundamentales son:

- Es impredecible, desordenado, con variaciones aleatorias de sus parámetros (velocidad, presión, densidad, etc.) en el tiempo y en el espacio, aunque el flujo medio sea estacionario.
- Produce mezcla y transferencia de energía rápidamente, es muy disipativo y difusivo, produce mezcla con mucha más efectividad que en un flujo laminar.
- Tiene una alta rotacionalidad y una transferencia de energía entre los remolinos de escalas espaciales diferentes.
- Interviene un gran rango de escalas espaciales.

4.1.6 Número de Reynolds

En un flujo turbulento la tensión de corte causada por la turbulencia es mucho mayor del que la que produce la viscosidad molecular, ya que las capas adyacentes tienden a tener velocidades similares, es decir que el flujo turbulento introduce una fuerza de arrastre mucho mayor de lo que ocurriría en el caso laminar. Así Reynolds (1883) estableció un parámetro adimensional, conocido como Número de Reynolds (Re), que representa la razón entre la fuerza de inercia y la fuerza viscosa y permite clasificar el flujo en laminar y turbulento.

$$\text{Re} = \frac{V.L}{\nu} \quad \text{Ec. 4-7}$$

donde:

- V es una velocidad característica del fluido.
- L es una dimensión representativa, diámetro, longitud de onda.
- ν la viscosidad cinemática.

Un régimen laminar se caracteriza por valores bajos del número de Reynolds, es decir que dominan las fuerzas viscosas. Un régimen turbulento se caracteriza por valores altos del número de Reynolds, es decir que las fuerzas de inercia son dominantes

4.1.7 Ecuaciones de Reynolds

Reynolds hizo una descomposición estadística de las variables hidrodinámicas $u(x_i, t)$ en una media \bar{u} más una fluctuación u' , de manera que la media de fluctuaciones es nula en un intervalo de tiempo característico T .

$$u(x_i, t) = \bar{u}(x_i, t) + u'(x_i, t) \quad \text{Ec. 4-8}$$

Esto supone que las fluctuaciones u' , v' , w' , al estar multiplicadas y promediadas se convierten en correlaciones (covarianzas) $\overline{u'v'}$, $\overline{v'w'}$, $\overline{u'w'}$. Así, las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas tienen la misma forma que las originales, excepto por la aparición de nuevos términos de fuente, llamadas tensiones de Reynolds, que acoplan el campo medio con el campo fluctuante.

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \bar{u} - \rho \left(\frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \bar{v} - \rho \left(\frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'^2}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \bar{w} - \rho \left(\frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'^2}}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad \text{Ec. 4-9}$$

que se pueden expresar en forma tensorial como:

$$R = \rho \begin{bmatrix} \overline{u'u'} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{v'u'} & \overline{v'v'} & \overline{v'w'} \\ \overline{w'u'} & \overline{w'v'} & \overline{w'w'} \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 4-10}$$

Las correlaciones representan el transporte de momentum en una dirección (i) hacia otra dirección (j) o viceversa, ya que son simétricos.

El tensor de Reynolds introduce seis nuevas incógnitas, por lo que el problema no está cerrado. Para su resolución hay tres grandes frentes de investigación: analítico, numérico y experimental o fenomenológico, en los que se hará hincapié más adelante.

4.1.8 Difusión molecular. Ley de Fick

Es un proceso irreversible por el que las partículas de un contaminante en un medio gaseoso o líquido en reposo, se desplazan mezclándose hasta su homogeneización. Su parámetro representativo es la concentración C , la cantidad de masa por unidad de volumen.

Según la ley de Fick el **flujo** de partículas F_c , cantidad de masa que atraviesa una superficie por unidad de tiempo, tiene dirección opuesta al gradiente de la concentración de las mismas y es proporcional a él. El coeficiente de proporcionalidad es el **coeficiente de difusión D**

$$F_c = -D \frac{dc}{dx} \quad \text{Ec. 4-11}$$

El origen físico de este proceso se debe a las colisiones entre átomos y moléculas. Si el tamaño de las moléculas suspendidas y las moléculas del medio es el mismo se habla de Difusión Molecular, como una gota de tinta en agua en reposo sin aportes de calor ni otros agentes.

4.1.9 Difusión turbulenta

Para medios en movimiento se produce una difusión turbulenta por el transporte de una cantidad dada debido a los movimientos asociados a las fluctuaciones en el fluido. Cuando se considera la difusión turbulenta de un escalar, normalmente se asume que existe una analogía entre procesos moleculares y turbulentos. Debido a esta analogía, algunos autores observan que los remolinos que son característicos del flujo turbulento poseen fluctuaciones similares al movimiento molecular. La difusión turbulenta es mayor que la molecular, aunque para escalas grandes se puede aplicar la teoría molecular.

Para el coeficiente de **difusión turbulenta K** la conservación de la masa admite el mismo argumento, sólo que considerando las fluctuaciones del flujo en el tiempo y en

el espacio, se interpreta como una relación lineal entre flujos turbulentos $\overline{u'c'}(x, y, z, t)$ y gradientes espaciales. (Masch, 1963). Así la ecuación de difusión turbulenta es:

$$\frac{dc}{dt} = \frac{d}{dx} \left(K(x, y, z, t) \frac{dc}{dx} \right) \quad K = \frac{\overline{u'c'}}{dc/dx} \quad \text{Ec. 4-12}$$

Generalmente, la difusión turbulenta es mucho mayor que la difusión molecular pero, en la naturaleza, cuando ocurre difusión turbulenta a la vez actúa también la difusión molecular y es muy común que existan procesos de intercambio entre flujos turbulentos y no turbulentos. La suma de los dos tipos de difusiones puede entonces calcularse:

$$\frac{dc}{dt} = D \frac{d^2c}{dx^2} + \frac{d}{dx} \left(K \frac{dc}{dx} \right) \quad \text{Ec. 4-13}$$

El coeficiente K también podría depender de la dirección, representándose entonces por un tensor K_{ij} , con $1 \leq i, j \leq n$ y n es el número de dimensiones espaciales.

$$K_{ij} = \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{pmatrix} \quad \text{Ec. 4-14}$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \left(\vec{V}(x, y, z, t) \cdot \vec{\nabla} \right) c = D \vec{\nabla}^2 c + \vec{\nabla} \cdot \left(K(x, y, z, t) \cdot \vec{\nabla} c \right) \quad \text{Ec. 4-15}$$

4.1.10 Mecanismos de dispersión

Inman et al. (1971), estudiaron el comportamiento de una sustancia conservativa introducida en un fluido, este puede ser dispersado de dos formas:

- Si el centro de masa del trazador se mueve con la corriente presente, este tipo de dispersión es atribuido a la advección o a la circulación (domina el término $\vec{V} \cdot \vec{\nabla} c$).
- Si el trazador se expande radialmente con cambios en la concentración, el efecto es atribuido a la difusión (domina el término $K \nabla^2 c$).

En otras palabras, la advección transporta y la difusión produce mezcla que se refleja con el aumento del área del trazador con el tiempo. Estos procesos también ocurren asociados, como por ejemplo puede darse la dispersión de un trazador de grandes dimensiones por varios remolinos pequeños siendo el agente provocador la difusión aunque existan procesos advectivos en la escala de los remolinos.

También es común que estos procesos se den en secuencia, y a varias escalas, actuando primeramente un proceso y después otro, dando continuidad a la dispersión. Por ejemplo, cuando la concentración del trazador se torna uniforme en una determinada área y la mezcla por la difusión en esta zona ya no es importante, la advección y otros fenómenos a gran escala dominan la futura dispersión del trazador.

Así, la importancia de los mecanismos de advección y difusión depende de las escalas temporales y espaciales de los procesos de dispersión.

4.1.11 Dispersión horizontal

Para las **escalas espaciales** las distribuciones de las componentes de la velocidad se pueden clasificar en dos tipos de procesos: 2D (dos dimensiones) y 3D (tres dimensiones), relacionados respectivamente con difusión a gran escala y a pequeña escala. El fenómeno de la turbulencia es tridimensional pero el análisis bidimensional es una forma de simplificarlo, ya que en los océanos las magnitudes horizontales son algunos órdenes de magnitud mayores que en la dirección vertical.

En este estudio se considera la dispersión horizontal (se tomará el plano (x,y)) de esta forma:

$$K_{ij} = \begin{pmatrix} K_x & 0 \\ 0 & K_y \end{pmatrix} \quad \text{Ec. 4-16}$$

Además, se considera un sistema de referencia móvil solidario a la mancha que se difunde. Por tanto la advección es nula y se tiene:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) \quad \text{o} \quad \frac{\partial \bar{c}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) \quad \text{Ec. 4-17}$$

Si K es constante en una dirección se tiene:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = K_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad \text{y} \quad \frac{\partial c}{\partial t} = K_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \quad \text{Ec. 4-18}$$

Entonces:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \vec{K} \cdot \nabla^2 c \quad \text{Ec. 4-19}$$

La solución de la ecuación de difusión en la dirección x en un proceso browniano es;

$$c(x,t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi Kt}} e^{-\frac{x^2}{4Kt}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{\rho}{2}\sigma}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad \text{Ec. 4-20}$$

$$\sigma^2 = 2Kt \quad K = \frac{\sigma^2}{2t} \quad \text{Ec. 4-21}$$

Según Einstein (1905), también se puede expresar el coeficiente de difusión como:

$$K = \frac{1}{2} \frac{d\sigma^2}{dt} \quad \text{Ec. 4-22}$$

$$\frac{x^2}{2\sigma^2 t} \quad \frac{x^2}{2\sigma^2 t} \Rightarrow 2\sigma^2 = 4K \quad \frac{d(\sigma^2)}{dt} = 2K \Rightarrow \sigma^2 = 2Kt \quad \text{Ec. 4-23}$$

4.1.12 Agentes actuantes

El comportamiento del oleaje en relación con la difusión cambia mucho según el tipo de oleaje. Las olas formadas por vientos locales son olas de pequeñas crestas y muchas de ellas rompen introduciendo un movimiento turbulento significativo y son de carácter irrotacional. Las olas del tipo mar de fondo ("swell"), que tienen su origen en tormentas distantes, son mucho más regulares y su movimiento es prácticamente irrotacional.

Debido a esto, este tipo de ola no es tan efectivo en procesos de mezcla, aunque favorece el transporte de masa. Este transporte ocurre en la dirección de propagación del oleaje y es muy importante en la advección debido a la generación de corrientes inducidas por el oleaje. En la zona de rotura, la mezcla inicial y la dilución dependen primariamente de la mezcla turbulenta que resulta del movimiento de traslación propio del oleaje y que está próximo a la superficie combinado con el movimiento turbulento de rotura del oleaje.

La interacción olas-corrientes es otro agente causante de la difusión. Los estudios experimentales comprueban la importancia en la dispersión de la combinación entre ondas y corrientes. Estudios realizados por Zeidler et al. (1976) confirman que esta relación de interacción entre ondas y corrientes es bastante significativa al comparar situaciones opuestas. Se encuentra que las ondas originan un comportamiento de fuerte dispersión, como un factor de aceleración después que las olas rotan un cierto ángulo crítico con respecto la dirección de advección resultante, y presentan un equilibrio si este ángulo no es realmente alto.

Un factor muy importante en los procesos de difusión en el océano es el rango de escalas de trabajo, pues estas determinan las fuerzas básicas que serán dominantes. Las fuerzas que actúan en el océano fueron clasificadas por Apel (1995), en cinco clases:

- Fuerzas Gravitacionales y Rotacionales
- Fuerzas Termodinámicas
- Fuerzas Mecánicas
- Fuerzas Internas: de presión y viscosidad.
- Fuerzas de Contorno

En el océano existen dos mecanismos importantes que determinan las escalas: la rotación y la estratificación. La rotación no parece que sea relevante en el rango delimitado por $1 < \ell < 20$ m y de segundos $< T <$ horas, ya que el parámetro de Coriolis es $f \cong 10^{-4}$ seg y la estratificación sólo será importante cuando la densidad de los trazadores sea muy distinta, como en el caso del petróleo.

Aquí actúan fuerzas mecánicas del tipo de las citadas más arriba, como la tensión del viento sobre la superficie del mar, la cizalla entre dos flujos etc. También son importantes las condiciones de contorno traducidas por la morfología costera (configuración de línea de costa y batimetría).

El transporte mecánico puede ser dividido en dos partes: a) transporte por medio de velocidad de corriente (advección); b) transporte causado por la presencia de fluctuaciones aleatorias y caóticas en la velocidad de campo (difusión). Ozmidov (1990) dice que la predicción de transporte mecánico de sustancias en el océano es difícil y requiere conocimiento de la regularidad de los factores que influyen en el proceso.

Un factor importante es la dirección de propagación de la difusión, que en general ocurre en ambas direcciones, vertical y horizontal. La mayoría de los trabajos se han enfocado más a la difusión horizontal que a la difusión vertical en tres dimensiones. Esto se debe a la dificultad del análisis de los problemas de mezcla vertical que involucran movimientos complejos (estratificación, ondas internas etc) y la influencia de la gravedad. Aunque muchos autores se han dedicado en mayor medida a los procesos de mezcla horizontal, no considerando el estudio de la mezcla vertical por ser esta menor en relación a la mezcla horizontal, es importante conocer también la extensión de la mezcla vertical para estimar correctamente las concentraciones del trazador, o para estudios del plancton y de los procesos de transporte atmósfera-océano (ver Marrasé et al. 1997 y Gabaldon 2000), donde la mezcla y la difusión turbulenta vertical son fundamentales.

Masch (1963), observó que la mezcla y dispersión de material vertido (trazador) en el océano depende en general de 2 aspectos:

La mezcla inicial del trazador en las proximidades inmediatas del punto de descarga se puede considerar un problema de la difusión del chorro. La mezcla inicial está afectada por la disposición espacial entre la sustancia vertida y la masa de agua marina influenciada por los componentes oceanográficos, tales como corriente de marea, corriente debida al oleaje, corriente asociada con gradientes de densidades, corrientes inducidas por el viento y turbulencia debida al oleaje.

La acción del viento en la difusión sobre la superficie del mar es básicamente la transferencia de parte de la energía del viento hacia el agua, donde parte de esta energía es disipada por la turbulencia o acción viscosa y parte es utilizada para generar corriente. Cuando masas de viento soplan sobre la superficie del mar, éstas originan corriente sobre las capas superficiales del agua y, si el viento es suficientemente fuerte, además se forman ondas de superficie. Sin embargo, el desarrollo de esta corriente puede presentarse de forma retardada respecto a la aparición del viento, llegando a varias horas.

La tasa de energía que es transmitida por el viento hacia el agua puede ser descrita como producto de la tensión de cizalla entre la superficie del agua y la velocidad del viento. Un gran número de investigadores ha estudiado la naturaleza de la cizalladura en la superficie del agua y se han propuesto modelos basados en la rugosidad de la superficie del agua y en la velocidad del viento. La ecuación aquí empleada para calcular la tasa de transferencia del viento en la capa superficial también sigue esta línea: es la ecuación de tensión de Reynolds ($\tau_{Reynolds} = \rho \cdot u_*^2$).

4.2 ESCALAS ESPACIALES Y TEMPORALES

De una forma generalizada, la turbulencia o la difusión turbulenta puede ser dividida en escalas grandes y pequeñas. En el caso de turbulencia a gran escala, se considera el proceso como bidimensional y la energía del flujo puede tener direcciones opuestas. Por el contrario, la turbulencia a pequeña escala es siempre tridimensional, siendo la energía transferida hacia la pequeña escala (escala de Kolmogorov).

La escala de este trabajo corresponde a escalas más pequeñas, aunque también es interesante comprender los procesos turbulentos a mayor escala, porque son quienes aportan más energía y contribuyen considerablemente en la dinámica general de los océanos. Los procesos turbulentos a gran escala son dependientes de la rotación de la Tierra debido a la aceleración de Coriolis.

El origen de la gran escala turbulenta en el océano es el resultado de movimientos circulatorios que son directamente inducidos en el agua por la turbulencia producida por el viento, inestabilidades barotrópicas y baroclínicas de flujos a gran escala, vórtices originados sobre irregularidades topográficas del fondo marino o inclinaciones de superficies isopícnicas.

Candela (1997) concluyó que, según la zona marina en la que se trabaja, las escalas cambian considerablemente. La figura 4.1 complementa esta idea y muestra la variación de las características de las escalas temporales y espaciales.

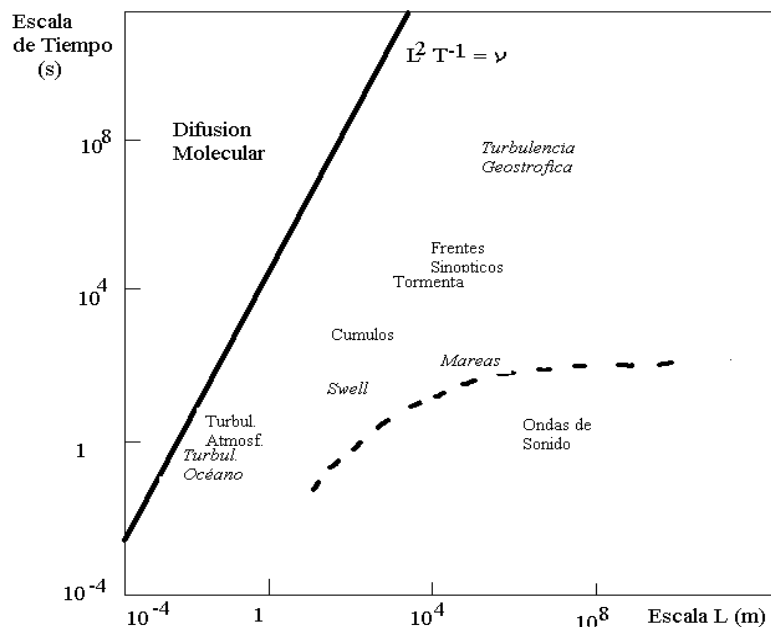


Figura 4-1. Escalas temporales y espaciales en el medio ambiente. Candela (1997)

Las pequeñas escalas turbulentas son según Monin (1970 a y b), generadas en el océano por los mecanismos siguientes (Figura 4.2):

- Inestabilidad del gradiente de velocidad vertical en la dirección del fluido (“drifting flow”).

- Rotura de ondas de superficie (“overtuning”).
- Inestabilidad del gradiente de velocidad vertical a gran escala en flujos oceanográficos estratificados.
- Inestabilidad hidrodinámica a media escala casi horizontal en flujos no estacionarios.
- Inestabilidad del gradiente de velocidad local en ondas internas.
- Convección en capas con densidad de estratificación inestable.
- Inestabilidad del gradiente de velocidad vertical en capas límites del fondo marino.

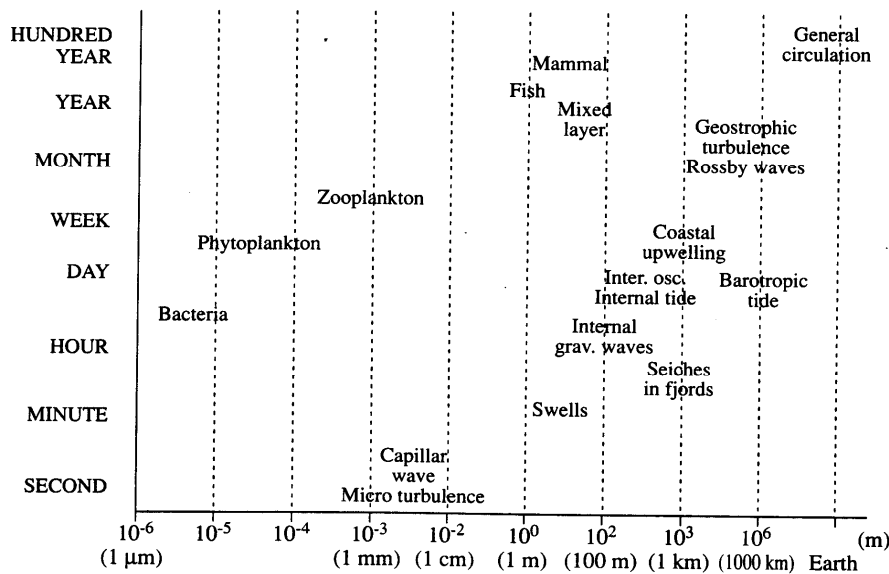


Figura 4-2. Escalas temporales y espaciales de procesos naturales bio-físicos. Monin (1970)

4.3 TEORÍAS SOBRE LA TURBULENCIA

4.3.1 Teoría de Kolmogorov y el Espectro Turbulento

La turbulencia es un fenómeno observado en flujos en geofísica, tanto en líquidos como en gases. Las variables termodinámicas e hidrodinámicas de estos flujos experimentan fluctuaciones caóticas, que son inducidas por vórtices de diferentes dimensiones (Ozmidov, 1990) que se superponen Richardson (1922). Las escalas de estos vórtices son, a su vez, gobernadas por diversos parámetros. Por ejemplo, en el océano o la atmósfera, los gradientes de temperatura (T) y/o de salinidad (S), la estratificación de la densidad, o las condiciones de contorno (capa límite atmosférica, topografía del fondo marino, proximidad con la costa etc.). Como estas variables cambian aleatoriamente en el tiempo y en el espacio, las escalas de longitud consecuentemente sufren fluctuaciones que responden a las escalas a las cuales hay un aporte de energía y a las que se disipa.

Los grandes vórtices están asociados con altos números de Reynolds y son siempre inestables, desintegrándose a su vez en vórtices pequeños que son más estables

(Figura 4.3). En el caso de vórtices bidimensionales, existe una cascada inversa de energía que estabiliza los vórtices grandes. Este fenómeno de transferencia de energía de los remolinos grandes a los remolinos pequeños hasta las escalas donde actúa la disipación viscosa es conocido como efecto de **cascada de Richardson** (Monin y Ozmidov, 1985).

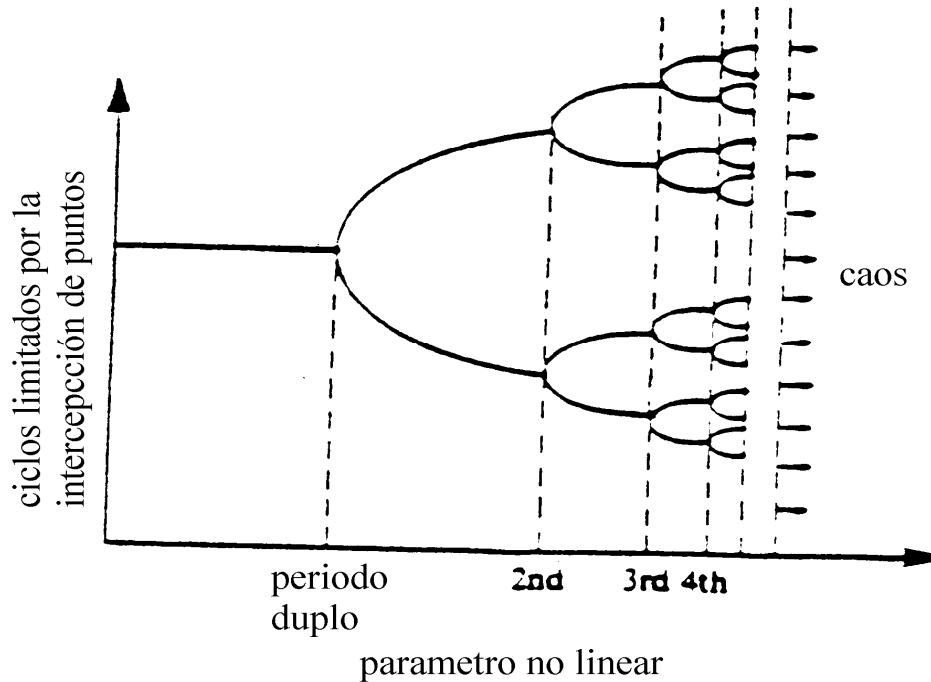


Figura 4-3. Transición de un movimiento estable hacia la Turbulencia (caos), de acuerdo con la Teoría básica de Kolmogorov. (1941)

El **espectro turbulento** representa la magnitud de la contribución de cada número de onda ($k = 2\pi/L$) o frecuencia de los remolinos superpuestos a la energía cinética ($E(k)$) turbulenta total (Stull, 1991).

El espectro se puede dividir en 4 zonas, como muestra la figura 4.4:

- Zona de remolinos grandes.
- Zona de remolinos de mayor energía.
- Zona de subrango inercial.
- Zona de dominio viscoso.

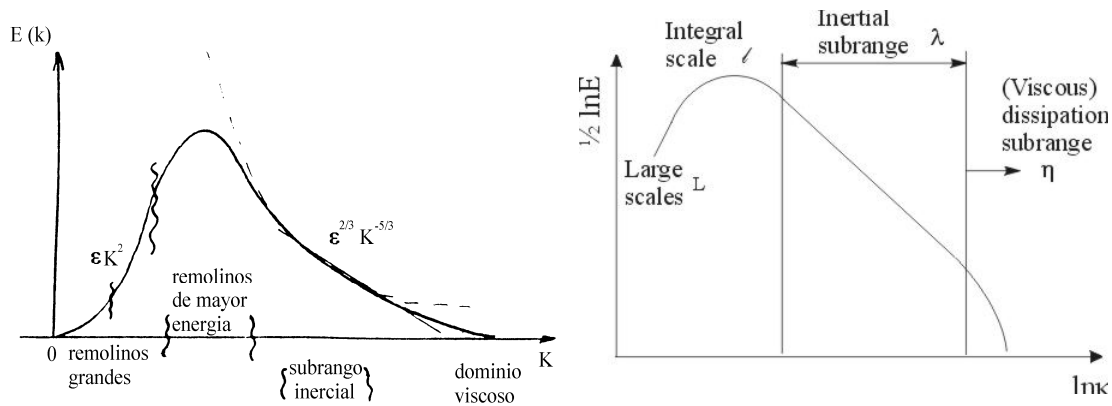


Figura 4-4. Zonas características del espectro turbulento.

Estas zonas delimitan el comportamiento de las escalas de la turbulencia y la distribución de energía.

Cuando el número de Reynolds es alto, el espectro de remolinos turbulentos se extiende sobre un amplio rango. Existe una fuerte interacción entre estos remolinos debido al carácter no-lineal y tridimensional de la turbulencia. La energía turbulenta suele generarse por medio de las inestabilidades del flujo medio, mientras que las escalas pequeñas son responsables de la disipación viscosa. La **disipación viscosa** (ν) convierte la energía cinética del movimiento en calor.

Entre la zona de los remolinos de mayor energía y la de disipación viscosa, existe una región llamada **subrango inercial** en el que la energía solo depende de la disipación por unidad de masa (ϵ) y el número de onda (k), formulando dos hipótesis principales:

- Existe un **rango de equilibrio** en que las propiedades medias de las componentes de la pequeña escala de Kolmogorov (η_k) de cualquier movimiento turbulento para grandes valores de Re son determinadas únicamente por la viscosidad ν y la disipación de energía másica ϵ . Las escalas de longitud y velocidad son

$$\nu_n = (\nu\epsilon)^{1/4} \quad \eta_k = (\nu^3/\epsilon)^{1/4} \quad \text{Ec. 4-1}$$

- Para números de Re altos, existe un “**subrango inercial**”, dentro del rango de equilibrio, que está cerca a su vez de la región viscosa, donde las estructuras de los remolinos son independientes de la entrada de energía o de la disipación viscosa y donde solamente la transferencia local de energía es importante. En este subrango las propiedades medias de los números de onda son independientes de ν y quedan determinados únicamente por ϵ . En este subrango inercial el número de onda k satisface $1/L \ll k \ll 1/\eta_k$ (Garratt, 1992), donde L es la escala integral. Se divide esta zona en p intervalos de número de onda (k), donde; $k = 2\pi/L$ siendo L la escala característica del remolino. Dimensionando el aporte y disipación de energía por unidad de masa ϵ respecto la velocidad V y periodo T

$$\varepsilon \approx \frac{V^2}{T} \approx \frac{V^3}{L} \tag{Ec. 4-2}$$

La Ley espectral de Kolmogorov (1941) considera que la disipación (ε) es constante en el “subrango inercial”, de manera que la velocidad relativa asociada V_n depende de la escala k_n del remolino y por lo tanto, de la integral de la densidad del espectro de energía $E(k)$,

$$V^2 = \int_0^\infty E(k)dk', \quad E(k) \approx \varepsilon^{2/3} \cdot k^{-5/3}, \quad V_n^2 \approx \varepsilon^{2/3} \cdot k_n^{-2/3} \tag{Ec. 4-3}$$

Las propiedades estadísticas de la turbulencia están determinadas únicamente por el ritmo de la energía disipada en el fluido y la escala en la llamada zona de “subrango inercial”.

En la turbulencia a gran escala intervienen los parámetros de cizalla ($S_{ij} = \partial \bar{u}_i / \partial x_j$), disipación de energía ε , y frecuencia k , esto es $\mathbf{E} = \mathbf{E}(\mathbf{S}, \varepsilon, k)$. En cuanto a la turbulencia a pequeña escala, la energía del espectro depende de la viscosidad ν , la disipación de energía ε y la frecuencia k , siendo $\mathbf{E} = \mathbf{E}(k)$.

Chassaing (2000) comparó diferentes experimentos y mostró como aumenta el rango espectral con el número de Reynolds como se ve en la figura 4.5.

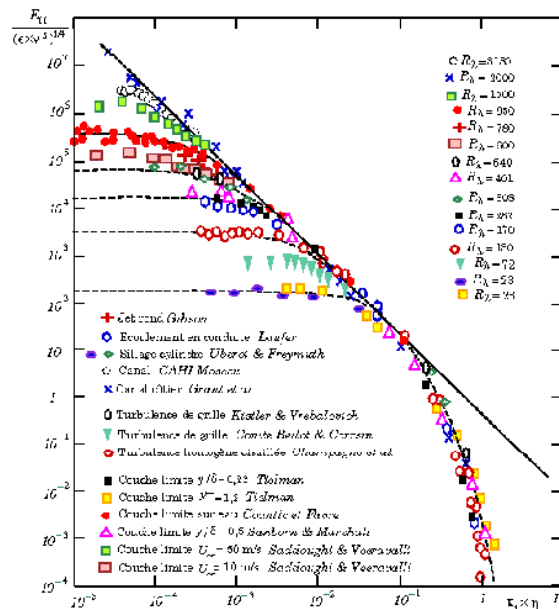


Figura 4-5. Experimentos con distintas energías de Chassaing (2000)

En síntesis, el flujo de energía permite hacer una clasificación de las longitudes de las escalas turbulentas.

Escala externa L, como escala determinada por las condiciones de contorno es la escala del flujo medio turbulento.

Escala Integral: ℓ es la integral de la autocorrelación espacial $R(x)$ entre fluctuaciones de velocidad u' y la varianza σ^2 de la fluctuación u' .

$$\ell = \int_0^{\infty} R(x) dx \quad R(x) = \frac{\overline{u'(a)u'(a+x)}}{\sigma^2} \quad \text{Ec. 4-4}$$

Microescala de Taylor λ , es aquella escala a la que la producción local de energía cinética turbulenta se iguala a la disipación local (Taylor, 1931); está asociada a la curvatura de las correlaciones espaciales de velocidad $R(x)$.

$$\varepsilon = 2\nu \frac{u'^2}{\lambda^2} \quad \text{Ec. 4-5}$$

Microescala de Kolmogorov: η_k es aquella pequeña escala en la que existe isotropía local, esto es, que los remolinos pequeños son independientes de la dirección en el espacio o de la forma del flujo. En esta región del espectro las variaciones con el tiempo son muy rápidas.

4.3.2 Teoría de Boussinesq

Boussinesq, para simplificar la ecuación de Reynolds, usa una analogía entre los tensores viscoso y turbulento introduciendo **el coeficiente de difusión de momentum turbulento** K_m , con las mismas dimensiones del coeficiente de viscosidad cinemática molecular ν . En el caso de un flujo paralelo uniforme en un plano en la dirección x ($\bar{u} = \bar{u}(z), \bar{v} = 0, \bar{w} = 0$), K_m se define mediante la relación entre el flujo de momentum y el gradiente vertical de velocidad media, de forma:

$$\overline{\rho u'w'} = -\rho K_m \left(d\bar{u}/dz \right) = -A \left(d\bar{u}/dz \right) \quad \text{Ec. 4-6}$$

y análogamente a la viscosidad dinámica μ , multiplicando por la densidad ρ , se define **A**:

$$K_m = \frac{A}{\rho} \quad A \leftrightarrow \mu \quad K_m \leftrightarrow \nu \quad \text{Ec. 4-7}$$

Entonces la tensión de cizalladura $|\tau|$ ("shearing stress") global, incluyendo tanto las tensiones viscosas como las turbulentas será:

$$|\tau| = -(\mu + A) \left(d\bar{u}/dz \right) \quad \text{Ec. 4-8}$$

De estas relaciones se puede ver que el término de viscosidad (o difusividad de momentum) turbulenta actuará conceptualmente de forma similar a los términos viscosos, aunque ya no serán constantes, sino que dependerán del tipo de flujo.

Las viscosidades moleculares y turbulentas se pueden sumar, pero como normalmente los valores turbulentos son de varios órdenes de magnitud superiores $K_m \gg \nu$, entonces se desprecian los componentes moleculares de las tensiones, de forma que

$$|\tau| = -A \cdot \left(d\bar{u}/dz \right) = -\rho K_m \left(d\bar{u}/dz \right) \quad \text{Ec. 4-9}$$

La teoría de Boussinesq no considera K_m constante, en cuanto ésta puede variar tanto en el espacio como en el tiempo o con el tipo de flujo. En algunos casos, como en la atmósfera o el océano, donde la variabilidad principal depende de la altura (o profundidad), se utilizan modelos sencillos de variación de las viscosidades turbulentas manteniendo la hipótesis de Boussinesq de proporcionalidad entre los flujos y los gradientes. Esta es una de las teorías que más se usan para modelos geofísicos de transporte turbulento.

4.3.3 Teoría de Prandtl para la Longitud de Mezcla

La teoría de longitud de mezcla (ℓ) fue introducida por Prandtl por analogía con el recorrido libre medio molecular, tal como es definido en la teoría cinética de los gases. Según esta teoría, la transferencia de momentum lineal se produce por choques entre moléculas que se mueven de forma aleatoria.

Limitando la teoría al transporte vertical de momentum

$$\bar{u} = \bar{u}(z), \bar{v} = 0, \bar{w} = 0 \quad \text{Ec. 4-10}$$

Las correlaciones $\overline{u'w'}$ son proporcionales a la diferencias en la velocidad media a distintas alturas, con un coeficiente de proporcionalidad ℓ_m la **longitud de mezcla**.

$$d\bar{u} = \ell_m \left(d\bar{u}/dz \right) \quad \text{Ec. 4-11}$$

Dimensionalmente, si se multiplica este vector por si mismo, se obtiene un escalar, la **difusividad turbulenta de momentum (Km)** o **viscosidad turbulenta**, que según la definición se interpreta como el producto de una velocidad y una longitud característica del flujo:

$$Km = cte. = d\bar{u} \cdot \ell \quad \text{Ec. 4-12}$$

Usando la diferencia de velocidad media como característica de las fluctuaciones $du=u'$ y suponiendo que la escala integral es proporcional a la longitud de mezcla, se tiene que:

$$Km = -\ell_m^2 \left(\frac{d\bar{u}}{dz} \right) \quad \text{Ec. 4-13}$$

$$\overline{u'w'} = -\ell_m^2 \left(d\bar{u}/dz \right)^2 \quad \text{Ec. 4-14}$$

La interpretación de ℓ_m o “longitud de mezcla” como transporte de una propiedad, puede extenderse a cualquier escalar o vector en el flujo, siempre que se considere que los gradientes de dicha propiedad son constantes a esa escala.

Se puede determinar un coeficiente de dispersión turbulento variable en el espacio recogiendo la variación espacial de la propia longitud de mezcla como:

$$K_m(x, y, z) = -\ell_m(x, y, z)^2 \left| \frac{d\bar{u}}{dz} \right| \quad \text{Ec. 4-15}$$

Y en el caso de la viscosidad turbulenta dinámica A ,

$$A = \rho K_m = -\rho \ell_m^2 \left| \frac{d\bar{u}}{dz} \right| \quad \text{Ec. 4-16}$$

Prandtl se basa en parámetros de fácil interpretación física, como la longitud media para la que los remolinos ceden todo su momentum al flujo.

4.3.4 Teoría del Transporte de Vorticidad de Taylor,

En lugar de considerar los cambios de momentum lineal de una capa a otra como Prandtl, Taylor consideró los cambios de momentum angular o vorticidad.

Para algunos casos particulares, estas dos formas dan el mismo resultado, como en la distribución de la velocidad en un chorro de dos dimensiones. En cambio, cuando la longitud de mezcla depende de la posición de forma más compleja, se obtienen resultados diferentes, Taylor (1931).

Para algunos casos especiales, donde la turbulencia está formada por remolinos con una escala de tiempo mayor que el tiempo en que el remolino pasa a través del sensor de velocidad (Powell & Elderkin, 1974), la turbulencia puede ser considerada como “congelada”, esto es, las fluctuaciones temporales pueden ser consideradas como espaciales ($d\xi/dt = 0$, simplificación de Taylor).

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = -u \frac{\partial \xi}{\partial x} - v \frac{\partial \xi}{\partial y} - w \frac{\partial \xi}{\partial z} \quad \text{Ec. 4-17}$$

Así, la velocidad puede ser usada para convertir medidas turbulentas en función del tiempo a la correspondiente medida en función del espacio. Es preciso resaltar que la turbulencia no permanece constante frente a la convección.

Esta hipótesis puede también ser expresada en términos de número de onda, $k = 2\pi/\lambda$ y frecuencia $\omega = 2\pi/T$, para longitud de onda λ y período de onda T característicos de los remolinos de forma sencilla como:

$$k = \frac{\omega}{u} \quad \text{Ec. 4-18}$$

Si se utilizan las escalas integrales de longitud Λ y tiempo θ

$$\Lambda = \frac{\theta}{u} \quad \text{Ec. 4-19}$$

Para satisfacer los requisitos de los cambios de los remolinos o vórtices mientras estos pasan por un sensor, se considera necesario que la desviación standard de la velocidad σ_u cumpla que:

$$\sigma_u < 0.5\bar{u} \quad \text{Ec. 4-20}$$

La hipótesis de Taylor puede usarse cuando la intensidad turbulenta I sea pequeña ($<1/4$) y entonces los remolinos de tamaño pasarán sin grandes cambios por el sensor de velocidad.

$$I = \frac{\sigma_u}{\bar{u}} \quad \lambda = \frac{I\bar{u}}{\frac{\partial \bar{u}}{\partial z}} \quad \text{c. 4-21}$$

4.3.5 Hipótesis de Similitud de Von Kármán

Según esta hipótesis, se intenta encontrar un valor de la longitud de mezcla (ℓ_m) independiente del tipo del flujo, de acuerdo con dos suposiciones de similitud:

- El mecanismo turbulento es independiente de la viscosidad (excepto en la zona próxima a una capa límite).
- Las fluctuaciones son estadísticamente las mismas para cualquier punto cambiando solamente las escalas de tiempo y longitud.

De estas suposiciones Von Karman determinó la constante de Von Karman κ según la altura z :

$$[\tau] = \rho \ell_m^2 \left| \frac{d\bar{u}}{dz} \right| \frac{d\bar{u}}{dz} \quad \ell_m \propto \kappa z \quad \text{Ec. 4-22}$$

donde supuso que la ley de mezcla está relacionada con la altura (z).

En el caso de cizalladura Prandtl la estimó como:

$$\ell_m = \kappa \frac{d\bar{u}/dz}{d^2\bar{u}/dz^2} \quad \text{Ec. 4-23}$$

$$[\tau] = \frac{\rho \kappa^2 (d\bar{u}/dz)^4}{(d^2\bar{u}/dz^2)^2} \quad \text{Ec. 4-24}$$

La constante de Von Karman es una constante universal, medida experimentalmente, con valores entre 0.38 a 0.4 (Stull, 1991).

4.4 CLASIFICACIÓN DE LA TURBULENCIA

4.4.1 Clasificación por escalas

Según Redondo et al. (1990) y Redondo (1995 y 1996) cuando la escala de la mancha que se difunde (D) es mayor que la escala característica de los remolinos (l), la mancha presenta sus bordes recortados. En el caso contrario, cuando la escala (l) es mayor que la escala (D), la geometría de la mancha tiene contornos más suaves por estar “protegida” dentro de la escala del remolino (figura 4.6). Para el caso en que la escala (l) sea proximadamente igual a la escala (D), la geometría de la mancha asume formas más sinuosas (Bezerra, 2000)

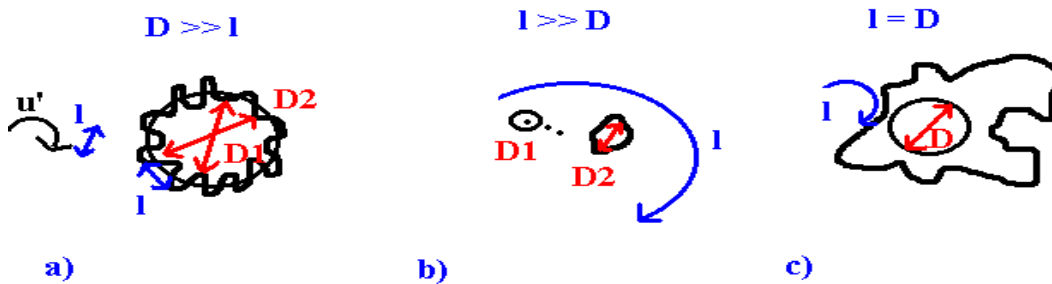


Figura 4-6. Difusión según la escala que la genere. Redondo 1990

Hipótesis de Taylor. Cuando la velocidad típica u' de la turbulencia cumple $u' \ll \bar{u}$, se convierte la dependencia espacial en una dependencia temporal, ya que $\ell = u' \tau$ donde ℓ y τ son las escalas integrales de espacio y tiempo.

$$\ell = \int_0^\infty R(x) dx \quad \tau = \int_0^\infty R(t) dt \quad \text{Ec. 4-25}$$

Aquí $R(x)$ es la función de correlación entre las velocidades. Al aplicarse la Hipótesis de Taylor se tiene que $\ell = \bar{u} \tau$.

El proceso de difusión turbulento de concentración se modela mediante la ecuación de Fick, aquí reescrita de forma vectorial

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} c = \vec{\nabla} \cdot K(x, y, z, t) \vec{\nabla} c \quad \text{Ec. 4-26}$$

Este proceso de difusión, como fue explicado anteriormente, está muy relacionado con las escalas, tanto espaciales como temporales (Figura 4.7), de lo que se deducirá el efecto de la escala (ℓ), en la dispersión a partir de la relación con la varianza σ :

$$K(t, \ell) = \sigma \frac{d\sigma}{dt} \quad \text{Ec. 4-27}$$

4.4.2 Difusión molecular

Integrando la ecuación para una difusividad $K(t, \ell)$

- K constante:

$$\int_{t_0}^t K dt = \int_{\sigma_0}^{\sigma} \sigma d\sigma \tag{Ec. 4-28}$$

$$\frac{1}{2}(\sigma^2 - \sigma_0^2) = K(t - t_0) \Rightarrow \sigma \cong (2K)^{1/2}(t - t_0)^{1/2} \tag{Ec. 4-29}$$

Este caso de dispersión es análogo a la dispersión molecular

$$\sigma \propto t^{1/2} \tag{Ec. 4-30}$$

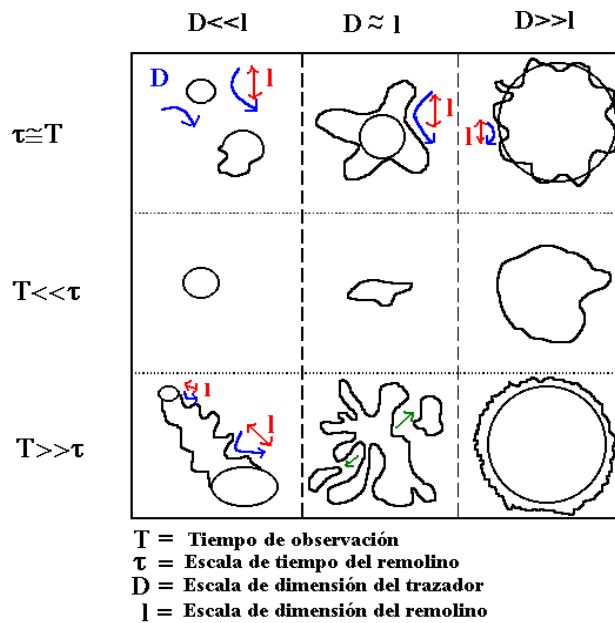


Figura 4-7. Difusión según la escala temporal y espacial. Redondo 1990

4.4.3 Subrango inercial

En el caso de difusión turbulenta dentro de un subrango inercial, el rango del espectro (η) entre la escala integral (ℓ) (producida por algún fenómeno relevante tal como la rotura de oleaje o la cizalladura del viento o las corrientes) y la escala de Kolmogorov:

$$\eta = \left(\frac{v^3}{\varepsilon} \right)^{1/4} \tag{Ec. 4-31}$$

Según la Teoría de Kolmogorov (1941), se tiene que las fluctuaciones de velocidad dependen de la escala, de forma que $u' = c\varepsilon^{1/3}\ell^{1/3}$.

Si se aplica este tipo de dependencia al cálculo del coeficiente de difusión cuando la escala integral es del mismo tamaño que la mancha difundida (caso c, figura 4.7) $\ell \approx \sigma$, y son las fluctuaciones de velocidad las que producen la difusión. Tomando;

$$K = \sigma \frac{d\sigma}{dt} = \ell u \quad \text{Ec. 4-32}$$

y sustituyendo la dependencia entre u y ℓ , se tiene en función de la turbulencia media, ε , que fue dada empíricamente por Richardson (1922), y se denomina Ley de Richardson.

$$K = c \varepsilon^{1/3} \ell^{4/3} \quad \text{Ec. 4-33}$$

Usando esta dependencia en la difusividad turbulenta $K(\ell)$ en un proceso de dispersión de un trazador, si se cumple que $\ell \approx \sigma$ se tiene una relación exponencial entre el tamaño de la mancha de trazador y el tiempo con exponente 3/2.

$$K(\ell) = c \varepsilon^{1/3} \ell^{4/3} = \ell \frac{d\ell}{dt} \quad \text{Ec. 4-34}$$

$$\int_{t_0}^t c \varepsilon^{1/3} dt = \int_{\sigma_0}^{\sigma} \ell^{1-4/3} d\ell \quad \text{Ec. 4-35}$$

$$\int_{\sigma_0}^{\sigma} \ell^{1-4/3} d\ell = \int_{\sigma_0}^{\sigma} \ell^{-1/3} d\ell \quad \text{Ec. 4-36}$$

$$\sigma \cong \left(\frac{3c}{2} \right)^{3/2} \varepsilon^{1/2} (t - t_0)^{3/2} \quad \text{Ec. 4-37}$$

Por lo tanto

$$\sigma \propto t^{3/2} \quad \text{Ec. 4-38}$$

4.4.4 Difusividad lineal

En el caso en que la **difusividad dependa linealmente de la escala**, tal como sucede con la difusión producida por la fricción de una superficie o cuando la turbulencia esta limitada por la costa, si se define una velocidad de fricción de forma similar al perfil logarítmico del viento, se tiene una dependencia lineal del tiempo.

$$u^* = \sqrt{\tau/\rho} \quad K = u_* \ell \quad \text{Ec. 4-39}$$

$$u_* \ell = \ell \frac{d\ell}{dt} \quad \text{Ec. 4-40}$$

$$\int_{t_0}^t u_* dt = \int_{\sigma_0}^{\sigma} d\ell \quad \text{Ec. 4-41}$$

$$\sigma - \sigma_0 = u_* (t - t_0) \quad \text{Ec. 4-42}$$

Por lo tanto

$$\sigma \propto t. \quad \text{Ec. 4-43}$$

4.4.5 Difusión anómala

En diversos procesos turbulentos donde hay aportes de energía a distintas escalas espaciales se describe la **difusión anómala** de forma general cuando

$$\sigma \propto t^{n/2}. \quad \text{Ec. 4-44}$$

En base a los exponentes, se pueden clasificar la difusión como balística ($\sigma^2 \propto t^{<1}$), gaussiana ($\sigma^2 \propto t^1$), inicial ($\sigma^2 \propto t^2$), Richardsoniana ($\sigma^2 \propto t^3$) con valores del exponente n entre n = 1 (caso de K = cte.) y n = 3 (caso de turbulencia homogénea $K = c\ell^{4/3}$, Ley de Richardson), como se ve en la figura 4.8.

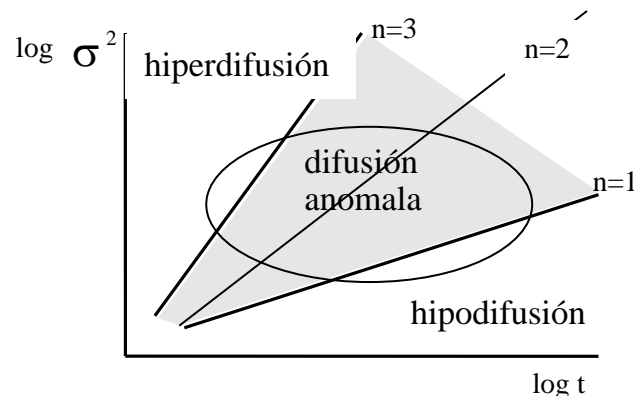


Figura 4-8 Difusión Anómala.

Los valores por encima de n=3 se pueden considerar hiperdifusivos, Los valores inferiores a n=1 hipodifusivos o de muy baja difusión. El caso de n=2 es la conocida como difusión balística. La difusión anómala engloba los distintos tipos, no Gaussianos y no característicos de la Ley de Richardson.

Castilla (2001) comparó con distintos modelos la dependencia entre el exponente n asociado a la difusión y la pendiente del espectro, corrigiendo el rango de aplicación de la Ley de Richardson generalizada.

En el anexo 1 se amplía la teoría de la turbulencia profundizando en los términos no lineales dando una descripción integral a distintas escalas, que nos llevan a los conceptos como helicidad y enstrofia. También se analiza en el concepto de intermitencia, ya que la turbulencia medioambiental no es homogénea ni isotrópica. Así se analizan algunas discontinuidades típicas de flujos estratificados. Por otro lado se presenta la técnica de estudio de la turbulencia como el análisis fractal y multifractal y su aplicación al análisis de cascadas turbulentas. Se analiza el factor de escala y su afección a los diferentes parámetros para ver la compatibilidad de las distintas escalas.

5 ANÁLISIS DIGITAL DE IMÁGENES

Una vez registradas las imágenes, se han de digitalizar para obtener una matriz numérica cuyo contenido, analizado adecuadamente, permite obtener resultados cuantitativos. Para conseguirlo es necesario realizar un proceso de manipulaciones, transformaciones y análisis específico en función de las condiciones de la grabación y del tipo de parámetro que se desee obtener.

Este apartado pretende ser un resumen donde reflejar la metodología empleada. Para mayor información se redactó un manual detallado de aplicación del sistema que puede ser útil para posteriores investigaciones. (Diez 1998)

5 ANÁLISIS DIGITAL DE IMÁGENES

Una vez registradas las imágenes, se han de digitalizar para obtener una matriz numérica cuyo contenido, analizado adecuadamente, permite obtener resultados cuantitativos. Para conseguirlo es necesario realizar un proceso de manipulaciones, transformaciones y análisis específico en función de las condiciones de la grabación y del tipo de parámetro que se desee obtener.

Este apartado pretende ser un resumen donde reflejar la metodología empleada. Para mayor información se redactó un manual detallado de aplicación del sistema que puede ser útil para posteriores investigaciones. (Diez 1998)

5.1 CAPTACIÓN DE LAS IMÁGENES

Para filmar la superficie marina a escala de 10-100 m con una buena resolución horizontal es necesario elevar la cámara al menos unos 10 m. Para ello, y en función del escenario, se emplearon diferentes medios de elevación: un globo de helio de 5 m de diámetro con la cámara suspendida en una plataforma y anclado con tres cabos de nylon, el extremo de un mástil de un velero, la pluma de una grúa de construcción, edificios altos de primera línea de mar, etc. Los dos primeros tienen el inconveniente de ser oscilantes según el viento; sin embargo tienen la ventaja de la proximidad y resolución de las imágenes de la zona de estudio.

Para analizar las imágenes, poder compararlas entre si y poder obtener verdaderas magnitudes, es necesario que haya puntos de referencia llamados puntos fiduciales. En la figura 5.1 se marcan puntos para la restitución. En zonas de playa, puertos o donde aparezcan puntos fijos es conveniente colocar marcas de referencia. Estos puntos deben aparecer distribuidos por toda la imagen para minorar errores, por lo que también es necesario que haya marcas en la zona de agua. En zonas de poca profundidad se pueden colocar boyas ancladas a muertos. En aguas más profundas se pueden tomar desde barco marcas de GPS sincronizadas con la toma de imágenes, por ejemplo el vertido de trazadores.



Figura 5-1. Marcando puntos de referencia

Para registrar un experimento conviene previamente determinar el campo visual de la imagen y ajustar la posición y orientación de la cámara, de modo que el dominio de los experimentos esté incluido en éste y que se vea con una resolución adecuada (por ejemplo que los puntos fiduciales se puedan distinguir, es decir, que ocupen al menos un píxel).

Además, hay que cuidar detalles como: tener una iluminación adecuada para que haya un buen contraste o eliminar sombras y reflejos.

TRAZADORES

Para obtener parámetros hidrodinámicos mediante el análisis de imágenes es necesario que haya evidencias visuales suyas. Si no se visualizan de forma natural se puede conseguir artificialmente, vertiendo un trazador.

Para el estudio de dispersión de contaminantes es necesario seleccionar una sustancia: que sea persistente, tenga un buen contraste, que no se altere con la presión, temperatura o salinidad, que no sea nociva para la flora o la fauna y, si es posible, que no sea muy cara. Por ejemplo en los experimentos de Delta 93 se compararon: Rodamina B, Fluoresceína sódica, Permanganato potásico, Cal y leche. Se demostró que la leche con fluoresceína daba un contraste y permanencia excelente. En la figura 5.2 se ven dos fotos de manchas de leche con y sin fluoresceína para ver la diferencia.



Figura 5-2. Comparación de dos manchas de leche, con y sin fluoresceína.

En el caso de seguimiento por partículas conviene que sean de un tamaño suficientemente grande para que ocupen al menos un píxel y de un color que de un buen contraste. Para atenuar el efecto del viento conviene darles cierto peso a los aros, boyas u otros trazadores lagrangianos, de modo que respondan más a la corriente que al viento.

Es deseable que si se toman medidas de otros parámetros adicionales se haga de forma sincronizada, pues aporta información adicional que permite estudiar la influencia de dichos parámetros en el proceso.

Una vez obtenidas las imágenes, se seleccionan los test de mayor interés en función del tipo de parámetro que se desee estudiar (dispersión, oleaje, etc.). Después se procede a elegir las imágenes especificadas y las ventanas correspondientes, como las que contengan la mancha de trazador.

Una imagen se digitaliza y se analiza como una matriz cuyos elementos son los píxeles y su valor es la intensidad de luz. Los datos de intensidad se analizan estadísticamente y así es posible el estudio de los parámetros con trazas visuales como la trayectoria, velocidad, concentración, forma y tamaño de la dispersión de una mancha.

5.2 CÁLCULO DIRECTO DEL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN TURBULENTA

En el artículo de Rodríguez et al. (1997 a), se describe la metodología de cálculo:

El cálculo del coeficiente de difusión turbulenta K según la analogía de Einstein 1905 con el movimiento Browniano, puede hacerse directamente a partir de la variación con el tiempo de la desviación estándar del tamaño de una mancha de trazadores o de un conjunto de boyas, $\sigma(t)$ de forma que;

$$K = \frac{1}{2} \frac{d \cdot \sigma^2(t)}{dt} = \sigma(t) \frac{d\sigma(t)}{dt} \quad \text{Ec. 5-1}$$

Con medidas en dos tiempos sucesivos t y $t + T$, indicado en la figura, se tiene;

$$K = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma(t+T)^2 - \sigma(t)^2}{T} \quad \text{Ec. 5-2}$$

$$K = \frac{1}{2T} (\sigma^2(t+T) - \sigma^2(t)) \quad \text{Ec. 5-3}$$

$$\sigma(t+T) = \sigma(t) + T \frac{d\sigma(t)}{dt} \quad \text{Ec. 5-4}$$

$$\begin{aligned} K &= \frac{1}{2T} \left(\left(\sigma(t) + T \frac{d\sigma(t)}{dt} \right)^2 - \sigma(t)^2 \right) = \frac{1}{2T} \left(\sigma^2(t) + 2\sigma(t)T \frac{d\sigma(t)}{dt} + T^2 \left(\frac{d\sigma(t)}{dt} \right)^2 - \sigma(t)^2 \right) \\ &= \sigma(t) \frac{d\sigma(t)}{dt} + \frac{T}{2} \left(\frac{d\sigma(t)}{dt} \right)^2 \end{aligned} \quad \text{Ec. 5-5}$$

de forma que despreciando el termino de 2 orden, se tiene;

$$K(t) = \sigma(t) \frac{d\sigma(t)}{dt}, \quad \text{Ec. 5-6}$$

que permite calcular la difusividad como el producto de la desviación estándar o tamaño típico de la mancha por la velocidad típica de agrandamiento. Llamando a los valores medios de la mancha en el tiempo t_0 como las medidas de difusión inicial se tiene:

$$\bar{\sigma}(t_0) = D \quad \text{y} \quad \frac{d\bar{\sigma}(t_0)}{dt} = V \quad K = DV \quad \text{Ec. 5-7}$$

Esta ecuación fue la utilizada en este trabajo para calcular los valores de difusión, siendo K el coeficiente de difusión dado en ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), D la distancia asociada al diámetro de la mancha en (m) y V la velocidad de crecimiento de la dimensión de la mancha en (m/s).

SISTEMÁTICA

Mediante el sistema del vídeo, la digitalización y las correcciones necesarias por las distorsiones producidas es posible seguir la evolución real de la mancha a lo largo del tiempo y cuantificar su dispersión. Para ello, se sigue el proceso numérico-estadístico siguiente:

i) Obtención de las ventanas de imágenes instantáneas: Se establece una relación, de tipo lineal en este caso, entre la intensidad de cada pixel de la imagen con la concentración del trazador en ese punto. Para observar el decaimiento de la concentración a medida que la mancha se dispersa, se toma una serie de imágenes instantáneas cada pequeño intervalo de tiempo. De cada imagen se extrae la ventana que contiene la mancha. Las variables que hacen referencia a ellas llevan un subíndice “*m*”.

ii) Corrección de la distorsión por el movimiento de la superficie libre: como la variación de la superficie del mar por efecto de las olas distorsiona la geometría de las manchas dificultando la medición de sus variaciones geométricas se debe corregir este efecto, tanto para la dimensión transversal como para la longitudinal. Para la dimensión transversal, K_{trans} , en los casos con rotura y corriente longitudinal intensa (≈ 1 m/s en los test 8 y 9) se generó, mediante el promediado temporal (en 30”), una “pluma ficticia”. La variación transversal de dicha pluma permitió conocer la evolución temporal de la varianza respectiva, y por lo tanto, la determinación de K_{trans} . Para la obtención de K_{long} se obtuvo la evolución de la magnitud longitudinal promediando las manchas en un periodo de ola y filtrando, posteriormente, el decaimiento de intensidades mediante un filtro no lineal.

iii) corrección del “background”: Las intensidades de cada mancha también están distorsionadas por la intensidad del fondo de la imagen, luminosidad o rugosidad variable. Ésta es distinta en cada lugar y en cada instante, pues la luz incide con distinto ángulo en cada punto y en cada momento por el movimiento que produce el oleaje. Debido a ello, se debe tomar para cada ventana otra de igual tamaño pero sin mancha, el “background”. Si se trata de una pluma, el “background” debe estar promediado durante el mismo tiempo que la imagen a tratar, pero cuando no haya mancha. Las variables que hacen referencia al mismo llevan el subíndice “*b*”.

Una vez obtenidos mediante *DigImage* los ficheros correspondientes a la digitalización y tratamiento de las imágenes, se pasa al tratamiento de éstos mediante *TICE*.

iv) Filtrado de la mancha: Para separar la mancha del fondo se hace un filtrado automático, que elimina los puntos de intensidad inferior a una intensidad de corte. Esta intensidad de corte es determinada en particular para cada imagen, pues la intensidad del campo digitalizado varía con el tiempo y en el espacio. Para elegir esta intensidad de corte, se posiciona el cursor en puntos que no haya mancha y se estima cual es la intensidad que mejor delimita el contorno de la mancha. Si la ola rompe sobre la mancha, la espuma producida oculta temporalmente la mancha o parte de ella; esta interferencia debe filtrarse manualmente, pixel a pixel, en cada imagen. Para ello es conveniente conocer bien la imagen real, ya que al digitalizar se modifica el color dificultando la identificación de la espuma, y escoger los instantes y las ventanas adecuadamente para poder eliminar en parte este efecto. Con las correcciones mencionadas, se pasa al tratamiento numérico de las matrices de intensidades para cuantificar la dispersión del trazador.

v) Cálculo de las varianzas ponderadas: Primero se determina el centro de la mancha (ξ_x, ξ_y) de cada ventana instantánea filtrada como momento de primer orden o centro de gravedad del campo de intensidades:

$$\xi_x = \frac{1}{MN} \sum_i \sum_j X_{i,j} \frac{I_{i,j}}{\left(\sum_i \sum_j I_{i,j} / N\right)} \quad \text{Ec. 5-8}$$

Donde $X_{i,j}$ es la coordenada horizontal real correspondiente al pixel de coordenadas (i,j) y, análogamente, $Y_{i,j}$ es la coordenada transversal. $I_{i,j}$ es la intensidad de ese pixel y N es el número de píxels de la matriz de la mancha filtrada.

Las varianzas, V_x , V_y y V_{xy} , se determinan como momento de segundo orden del campo de intensidades:

$$V_x = \frac{1}{N} \sum_i \sum_j (X_{i,j} - \xi_x)^2 \frac{I_{i,j}}{\sum_i \sum_j I_{i,j} / N} \quad \text{Ec. 5-9}$$

$$V_{xy} = \frac{1}{N} \sum_i \sum_j (X_{i,j} - \xi_x)(Y_{i,j} - \xi_y) \frac{I_{i,j}}{\sum_i \sum_j I_{i,j} / N} \quad \text{Ec. 5-10}$$

En los casos con rotura del oleaje que se han analizado, había una corriente longitudinal que arrastraba la mancha de derecha a izquierda de la imagen. Debido a ello, se determinó el eje de la pluma como lugar geométrico de los puntos de máxima intensidad de cada columna. Esta intensidad $I_p(i)$ permite determinar el decaimiento, pero hace falta la variación temporal correspondiente. Para ello, se necesita relacionar el eje de la pluma con la velocidad y tiempo transcurrido. Las variables que hacen referencia a la pluma llevan un subíndice "p"

El tiempo t_p correspondiente a la posición j en el eje de la pluma es:

$$t_p(j) = t_m(i) + F_{IT} * (t_m(i+1) - t_m(i)) \quad \text{Ec. 5-11}$$

siendo $t_m(i)$ el tiempo al que se tomó la imagen instantánea i -ésima y F_{IT} el factor de interpolación

$$F_{IT} = \frac{X_m(i) - X_p(j)}{X_m(i) - X_m(i+1)} \quad \text{Ec. 5-12}$$

Las intensidades interpoladas del suavizado de las imágenes instantáneas I_{suavp} y del "background" I_{bpm} se calculan como:

$$I_{suavp}(j) = I_{suavm}(i) + F_{IT} * (I_{suavm}(i+1) - I_{suavm}(i)) \quad \text{Ec. 5-13}$$

$$I_{bpm}(j) = I_{bpm}(i) + F_{IT} * (I_{bpm}(i+1) - I_{bpm}(i)) \quad \text{Ec. 5-14}$$

siendo I_{suavm} la intensidad suavizada de la imagen instantánea y I_{bpm} la intensidad del "background" del fondo.

El valor de la intensidad de la pluma corregido $I_{plumacor}$ debe multiplicarse por dos factores de suavizado: el de los picos de intensidad y el del “background”:

$$I(i, j)_{plumacor} = I(i, j)_{pluma} * \frac{I_{suavp}(j)}{I_p(j)} \frac{I_{bmed}}{I_{bp}(j)} \quad \text{Ec. 5-15}$$

siendo I_{bmed} la intensidad media del fondo

$$I_{bmed} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{bm}(i) \quad \text{Ec. 5-16}$$

Se calcula el coeficiente de dispersión transversal como ya se indicó previamente:

$$K_{trans} = \frac{1}{2} \frac{d\sigma_t^2}{dt} \quad \text{Ec. 5-17}$$

donde σ es la desviación estándar. Para calcular la derivada temporal se hace una aproximación como diferencias finitas de primer orden.

$$K_{trans} \approx \frac{1}{2} \frac{\Delta\sigma_t^2}{\Delta t} = \frac{1}{2} \frac{(\sigma_{i+1}^2 - \sigma_i^2)}{(t_{i+1} - t_i)} \quad \text{Ec. 5-18}$$

Los incrementos de tiempo se obtienen a partir de la coordenada X de la posición de la pluma dividida por la componente horizontal de la velocidad por advección de la mancha $VELX$:

$$\Delta t_i = \Delta X_i / VELX \quad \text{Ec. 5-19}$$

$$VELX_m(j) = \frac{(X_m(i+1) - X_m(j))}{(t_m(i+1) - t_m(i))} \quad \text{Ec. 5-20}$$

La evolución de las varianzas longitudinales, se obtiene de forma análoga, como ya se mencionó. En este caso, la determinación es más sencilla al promediar las manchas en un periodo de ola ($T \approx 5-6s$). Luego, como se muestra en la fig. 5, se suavizan los picos y se multiplican las intensidades respectivas por los factores de corrección.

5.3 SOFTWARE DE TRATAMIENTO AVANZADO DE IMAGENES

En el tratamiento digital de imágenes conviene distinguir entre los componentes físicos y los programas de cálculo o visualización. Existe una gran variedad de programas o “software” destinados al tratamiento de imágenes.

El programa utilizado permite digitalizar tanto series de imágenes instantáneas, como promediadas en forma de matrices de intensidades de 512 x 512 píxeles o ventanas de éstas que deben de ser filtradas manualmente y suavizadas para eliminar las interferencias producidas mediante un programa de tratamiento digital. También permite la obtención de series temporales de una línea, mediante la cual se pueden estudiar las ondas de borde y la zona de “swash”.

A partir de las imágenes filtradas y corregidas se realizan los cálculos numéricos y estadísticos para la determinación de cada parámetro. El análisis de imágenes de vídeo tiene muchas aplicaciones hidrodinámicas como:

Estudio de la geometría de la zona de rompientes.

Determinación de la fracción de olas rotas.

Estudio de la advección de trazadores lagrangianos (boyas).

P. I. V. (velocimetría por seguimiento de partículas).

Análisis de ondas de borde.

Determinación de coeficientes de dispersión horizontales.

Para el postproceso digital se utilizaron principalmente tres programas o “software” “DigImage”, “TICE” y “Kd”. A continuación se explican brevemente las características y aplicaciones de cada uno.

5.3.1 DigImage

DigImage es un sistema de digitalización y procesamiento de imágenes especialmente concebido para analizar flujos de fluidos en laboratorio. Fue desarrollado por el “Cambridge Environmental Research Consultants Ltd.”. Tiene una estructura de menú que permite acceder de forma estructurada a sus diferentes aplicaciones. Además ofrece las sentencias de seguimiento más comunes automáticamente y opciones de ayuda, agilizando y facilitando su empleo.

Este programa incluye las aplicaciones de procesamiento de imágenes comunes en estudios de dispersión turbulenta, chorros, plumas y flujos estratificados como las que se citan a continuación.

MANIPULACIONES

Distintas formas de capturar imágenes:

- Con control manual o por ordenador.
- Con un cierto retraso o a un tiempo especificado.
- Simples o una secuencia.
- Instantáneas o promediadas temporalmente.
- Manipuladas mediante operaciones lógicas o aritméticas.

Exponer imágenes temporalmente en 16 “buffers” (memoria extendida que permite visualizar una imagen):

- Imágenes completas o partes de éstas, denominadas ventanas.
- En verdadero color o escalas de falso color en función de la intensidad.
- Aumentadas 2, 4 y hasta 8 veces.
- Por la pantalla de la TV o por el monitor del ordenador.
- Con distintas escalas vertical y horizontal.
- En forma de mosaico de varias imágenes o ventanas.
- Estática o a modo de película de los “buffers” seguidos.

Guardar el contenido de los “buffers” en un fichero:

- Las imágenes completas o ventanas de ellas.
- En un fichero.PIC o fichero.BMP.
- Salvar todos los “buffers” en una serie.
- Reproducir imágenes virtuales a partir de un fichero de intensidades.

Facilidades de manipulación para el diseño e impresión:

- Añadir texto.
- Seleccionar parte de una imagen.
- Pegar rectas, marcar contornos, curvas, bandas.
- Crear un fichero legible por una impresora de chorro de tinta.
- Borrar un buffer.
- Copiar la imagen de un “buffer” o una ventana en otro.
- Duplicar o rellenar regiones delimitadas por una isolínea.

CALIBRACIONES

Del campo de iluminación:

- Correcciones por la divergencia de los rayos.
- Correcciones por la atenuación de la luz al penetrar en la mancha.
- Correcciones por variaciones del fondo.

Correlación de la intensidad con la concentración de trazador:

- Con imágenes de calibración o mediante ajustes por fórmulas o mapas.

De las intensidades.

- Crear nuevas escalas de falso color para la intensidad.
- Reajustes del rango para aprovechar mejor la escala de grises.
- Recodificación de los colores básicos: rojo, verde y azul.

Del campo de coordenadas:

- Con funciones bidimensionales para ajustar las coordenadas píxel a las reales.
- Introducción de puntos de referencia para establecer coordenadas relativas.

TRANSFORMACIONES:

Computacionales entre varias imágenes:

- Operaciones lógicas y aritméticas entre dos imágenes.
- Promediados temporales de series continuas de imágenes.
- Promediados entre una serie de buffers.

- Crear y aplicar máscaras a imágenes.
- Combinar imágenes mediante una fórmula.

Filtros:

- De convolución básicos para suavizar contornos.
- Morfológicos: máscaras, erosión, dilatación.
- De entrelazado para evitar que la imagen vibre entre los dos campos que la componen.
- De paso bajo o sobre una intensidad umbral.
- De Fourier para realizar análisis espectrales.

Según isolíneas de intensidad:

- Localizar y marcar una o todas las isolíneas de una intensidad.
- Rellenar todo el interior o una franja con cierta intensidad.
- Eliminar los contornos pequeños.
- Ajustar el contorno a una curva por mínimos cuadrados.

Visuales para realzar el contenido:

- Invertir la escala de intensidades.
- Extender la escala de intensidades en un intervalo.
- Redefinir la escala de falso color.

TÉCNICAS DE ESTUDIO

Identificación de puntos:

- Posicionamiento de puntos mediante el cursor.
- Obtener sus características por monitor: coordenadas, intensidad, media y desviación respecto a su entorno.
- Crear ficheros de coordenadas e intensidad.

Estadísticas:

- De regiones definidas por un contorno.
- Centroides de ventanas.
- Velocimetría de partículas.
- Intensidad media y momentos de intensidad, por filas y/o columnas.
- Semejanza entre dos imágenes, por diferencias o por correlaciones cruzadas.
- Correlación entre variables.
- Longitudes características y dimensiones fractales 1D o 2D.

Representaciones de intensidad de secciones específicas:

- De una fila y una columna específicas, de una curva parametrizada, o 3D.
- Visualizar el gráfico sobre la misma imagen o en otro buffer.
- Guardar los datos en un fichero de datos.

Transformaciones de Fourier:

- 1D con resolución completa.
- 2D con resolución de 256*128.

Series temporales:

- De imágenes, líneas, puntos especificados o de puntos de máxima intensidad.
- A intervalos regulares de tiempo o a tiempos especificados.
- Tomas instantáneas o promediadas.

- Con control manual o por ordenador.

Seguimiento de partículas y determinación de sus trayectorias y velocidades:

- De partículas determinadas manualmente o por caracterizarse con cierta intensidad.
- Durante cierto tiempo o longitud.

Además, ofrece la posibilidad al usuario de desarrollar programas "FORTRAN" e introducirlos en el sistema.

5.3.2 "TICE"

T.I.C.E. (Técnica de análisis de Imágenes para la obtención del Coeficiente de dispersión Experimentalmente)" es un programa Fortran, para la manipulación de las ventanas de las imágenes obtenidas con DigImage, desarrollado por Bahia (1997). Está destinado especialmente al estudio de dispersión de trazadores en la zona costera.

La información procedente de una imagen digitalizada se encuentra en forma binaria. Para manipularla es conveniente reorganizar la información en forma de una matriz. Esta es una de las características principales del programa. En la figura 5.3 se puede observar una mancha digitalizada mediante DigImage, la matriz correspondiente a la intensidad de cada píxel y la matriz filtrada por TICE.

A pesar del gran número de aplicaciones que posee DigImage, carece de flexibilidad para el tratamiento de información puntual, a nivel de unos pocos píxels. Con la finalidad de superar estas dificultades y agilizar la metodología de análisis visual se elaboró TICE. El programa recoge todas las manipulaciones, correcciones y análisis necesarios para el estudio de la dispersión de trazadores y los aplica de forma ordenada. Muchas de estas aplicaciones también las recoge DigImage pero de forma aislada.

Además TICE procesa los datos de esta matriz utilizando algoritmos matemáticos que permiten obtener más información de la imagen.

A continuación se muestran las principales aplicaciones del programa:

- Corregir globalmente los píxels con intensidad superior a cierta intensidad de corte.
- Recortar la matriz de intensidades de forma más exacta.
- Corregir distorsiones locales que alteren el análisis.
- Realizar el análisis numérico-estadístico, de las matrices originales y corregidas, calculando su centro de gravedad, varianzas, covarianza y desviaciones.
- Obtener la evolución del coeficiente de dispersión de una serie de manchas.
- Transformación de coordenadas.
- Elaboración de gráficos de los resultados.

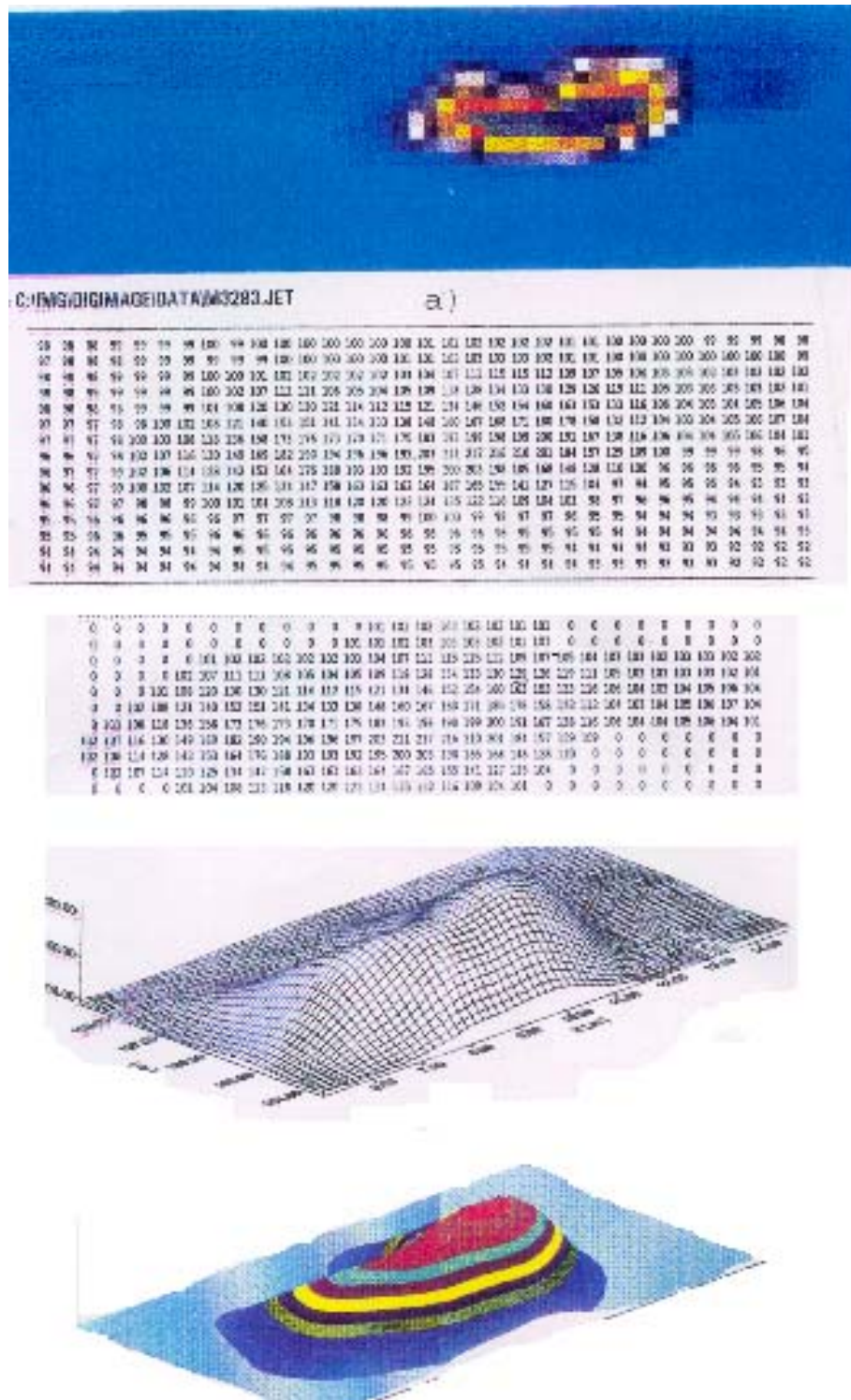


Figura 5-3 Proceso de análisis de imágenes de una mancha. Bahía (1997)

5.3.3 Kd.

Para el análisis de los experimentos de campo de esta tesis se desarrolló un programa basado en TICE (Diez 1998), de forma que permite un uso generalizado para distintas manchas e incorpora más aplicaciones. Además, el programa va acompañado de un diccionario de variables para que el usuario pueda saber cómo se calcula cada parámetro. La nomenclatura no tiene nada que ver con la propuesta en TICE, pues hubo variables que no se pudieron descifrar y se hizo por completo el programa.

Las nuevas aplicaciones son principalmente:

-Corregir globalmente los píxels con intensidad superior o inferior a cierta intensidad de corte. TICE solo fijaba un umbral inferior, pero puede ser interesante fijar uno superior para eliminar reflejos o espuma.

-Corregir distorsiones locales que alteren el análisis, no sólo a nivel puntual, píxel a píxel, sino que también permite eliminar una subventana.

-Eliminar las filas y columnas nulas del contorno. Esto es útil en casos de manchas muy grandes pues, no cabe toda la matriz en la pantalla y así se hace más pequeña.

-Calcular las magnitudes significativas de la mancha, evolución de los diámetros longitudinal y transversal de la mancha.

-Obtener ficheros de resultados por separado, por un lado las manchas filtradas y por otro los parámetros característicos de la mancha. Esto facilita su posterior manipulación.

Los datos se introducen mediante ficheros de datos externos, inicio y transformación de coordenadas, sin necesidad de modificar el programa cada vez en el fichero de inicio debe haber información para cada ventana de:

- El tiempo transcurrido desde el vertido. Normalmente, en la copia de seguridad, se sobregraba un contador temporal continuo; pero en casos en que la mancha se desplaza hacia la esquina superior izquierda se ha de quitar. En este caso, se puede obtener por diferencia con el contador del magnetoscopio.

- Nombre del fichero de transformación de coordenadas. Normalmente los experimentos se registran desde cámaras estáticas, de forma que el campo visual no cambia; pero es posible que la cámara se mueva u oscile, como en el caso de la cámara suspendida desde un globo aerostático. Así que la serie de imágenes no responde exactamente al mismo campo visual y la transformación de coordenadas es distinta.

- Coordenadas de la esquina superior izquierda e inferior derecha. Estos datos salen por el monitor del ordenador en el momento de capturar la ventana y hay que tomarlos. Sirven para dos cosas: primero obtener el formato del fichero binario para poder leerlo y segundo para conocer la posición relativa de la ventana en la pantalla, de cara a determinar su advección y a poder hacer la transformación de coordenadas (pues no es lineal).

- Intensidad de corte. Se define el contorno de la mancha mediante una isolínea de intensidad. Esta es específica para cada ventana, pues se produce una variación temporal y espacial del fondo. Para determinarla es necesario posicionarse en cada una y seguir su contorno para ver si se verifica. Éste es un parámetro que se estima subjetivamente. Cuando la concentración es baja puede resultar difícil de elegir.

- Factor de corrección correspondiente al suavizado del decaimiento de la intensidad. Se toma un punto de la mancha, el de intensidad máxima, y se asume que decae de forma continua. Las oscilaciones se suavizan interpolando una función polinómica. El factor de corrección será el cociente entre el valor bruto de la intensidad máxima y el interpolado. Esto supone que se ha de determinar la intensidad máxima, lo que se hace corriendo el programa con un factor unitario, mediante histogramas de frecuencias en DigImage o visualmente explorando la mancha. Este método es el mejor, pues permite establecer criterios de selección específicos. En ocasiones se trata de una zona con varios píxels, casos saturados, y en otras presenta varios centros oscilando entre ellos; este efecto se da al pasar una ola, pues no coincide la zona de concentración máxima con la posición más normal a la iluminación.

En el de transformación de coordenadas figuran:

- Los coeficientes necesarios para la transformación de cada eje. Estos datos los proporciona DigImage al introducirse en la opción (P)(W)(D) "Display world coordinate mapping". El programa está elaborado para que se tome una función de transformación bicuadrática con ocho coeficientes para cada eje, opción 6 del (P)(W)(M) "Mapping function".

- Las coordenadas en píxel de los puntos fiduciales en la imagen. Los puntos se han de poder identificar en la imagen con un píxel. Una de las comprobaciones que se ha de realizar durante los experimentos es que efectivamente los puntos de referencia se reconocen en la imagen. Posteriormente, como suelen ocupar más de un píxel, se ha de adoptar un criterio para elegir uno, por ejemplo el de máxima intensidad o el más central.

- Las coordenadas topográficas o locales de los puntos correspondientes en el terreno. Los experimentos se posicionan topográficamente respecto un sistema de coordenadas locales. Es conveniente realizar un buen croquis para identificar los puntos y numerarlos para distinguirlos.

Existen programas especializados en la transformación de coordenadas y de calibración de cámaras como el de Bouquet (2004 a).

5.3.4 DigiFlow

Para el análisis de fluidos mediante el seguimiento de partículas iluminadas se empleó el programa específico DigiFlow. Este correlaciona imágenes consecutivas dando un mapa de velocidades, y a partir de él, un mapa de vorticidad. Este proceso se realiza mediante la aplicación de máscaras de intensidad que captan las partículas iluminadas aislándolas del fondo más oscuro, para después determinar su posición dentro de unos límites más o menos cercanos, basándose en medias de intensidad y mecanismos estadísticos.

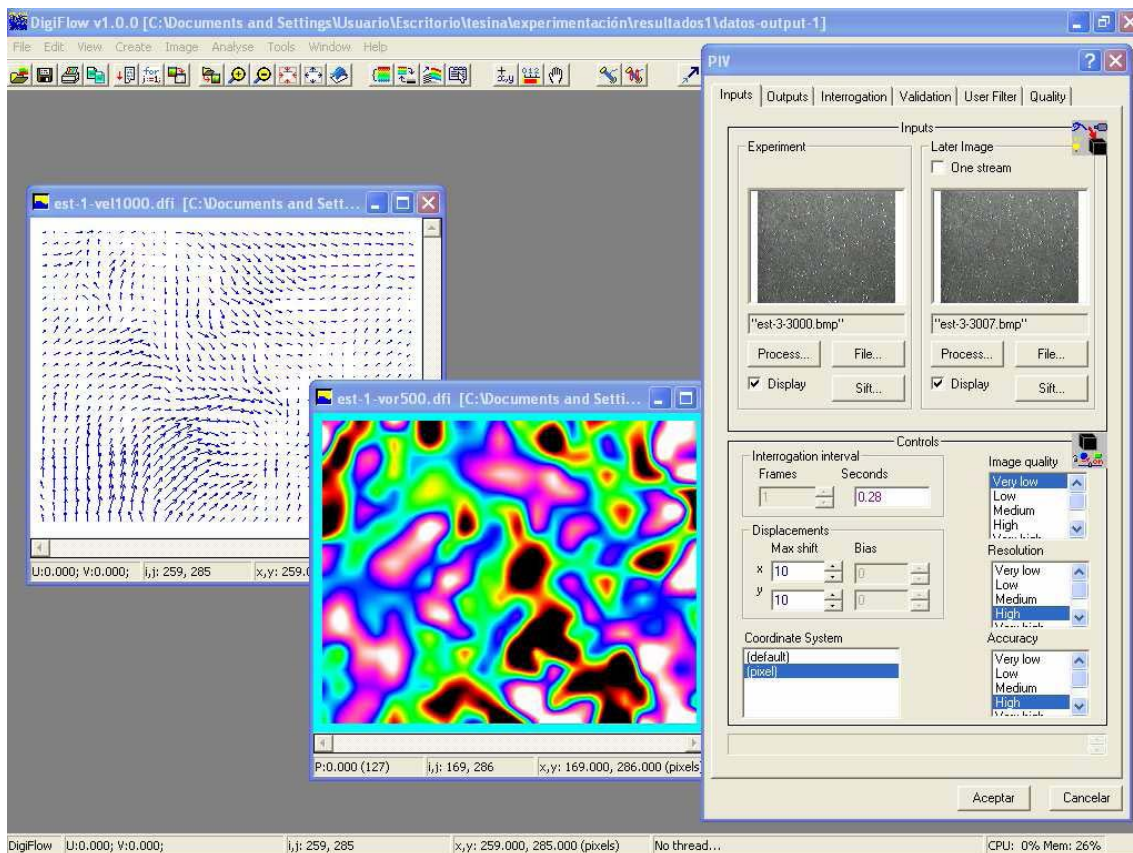


Figura 5-4 Captura de una pantalla de DigiFlow.

5.4 POSTPROCESO DIGITAL

Ahora que ya se conocen cuales son las herramientas de cálculo, se mostrará como emplearlas para aplicarlas al campo de la Hidrodinámica en la zona costera. A continuación se describirán las distintas fases seguidas durante el postproceso.

5.4.1 Tratamiento previo de las cintas.

En primer lugar hay que hacer un duplicado de las cintas de vídeo que contienen el registro de los experimentos pues, según las leyes de Murphy, es probable que se borren, sobregaben, deterioren o pierdan. Además, al manipularlas, sufren un desgaste que puede afectar a la calidad digital.

Aprovechando que se hace la copia es conveniente agregarle un indicador temporal para no tener que rebobinar toda la cinta cada vez que se quiera ir a un punto. Durante la grabación no se insertó pues, en ocasiones, esa parte de la pantalla es dominio de interés.

A posteriori se puede poner pues se tiene el original sin nada. Como no se disponía de un controlador temporal, se ingenió un mecanismo que introdujera la hora. El magnetoscopio dispone de una memoria para empezar a grabar y acabar a un tiempo especificado, presionando una tecla llamada "screen display". Previamente hay que poner el contador a cero al inicio de la cinta.

Al introducir o extraer una cinta del aparato se pone a cero automáticamente, pero no siempre la cinta está en el comienzo. Manteniendo presionada la tecla de inicio "begin" o final "end", se va registrando un contador de la hora, minuto y segundo de la reproducción en el lugar correspondiente. Al dejar de presionar se para, por lo que hay que fijarlo como se pueda. Se puede utilizar uno como contador continuo y otro como tiempo de referencia, por ejemplo del instante en que se vierte el trazador.

Una vez se obtuvieron todos los registros se elaboró un informe que describía el contenido de las cintas, experimentos, calidad, condiciones meteorológicas, etc. Facilitando la elección del test que se va a analizar.

Hay que comprobar que se dispone de todos los datos necesarios como: puntos suficientes para poder hacer una transformación de coordenadas, un dominio visual sin muchas distorsiones, un fondo suficientemente homogéneo, poco reflejo o espuma, etc.

5.4.2 Transformación de coordenadas

Una componente crucial en cualquier tipo de medición es la posibilidad de referir las medidas a un sistema de referencia estándar. En el caso del análisis por imágenes, hay que hacer una correspondencia que permita identificar cada punto de la imagen con una posición real.

Para poder pasar de una imagen bidimensional a una realidad tridimensional se debe realizar alguna hipótesis adicional, ya que todos los puntos de un rayo óptico tienen el mismo en la imagen. Normalmente se establece una correspondencia entre los puntos de una superficie de geometría conocida y los de la imagen de ésta.

Los ejes de coordenadas matriciales "I" y "J" tienen su origen en la esquina superior izquierda de la pantalla y corresponden, el "I" al número de fila, y el "J" al número de columna.

Para realizar dicha correspondencia se pueden emplear distintos tipos de transformación de coordenadas entre ambos sistemas, contenidos en el menú (P) "Coordinate System Mapping" opción (W) "World Coordinates". Las transformaciones predefinidas por Digimage son funciones polinómicas, pero permite programar otro tipo de transformaciones.

En cualquier tipo de transformación es necesario determinar sus coeficientes mediante puntos fiduciales, de los que se conozca su posición, y que puedan ser identificados en la imagen.

DigImage permite obtener estos coeficientes a partir de la identificación mediante el cursor e introducción de la posición de los puntos fiduciales, opción (L) "Locate world coordinate mapping". El programa permitirá elegir el tipo de función de transformación

en función del número de puntos, de forma que haya un número de coordenadas reales de puntos igual o superior al número de coeficientes de las dos funciones de transformación, una de cada eje. También permite el proceso inverso, a partir de ciertos valores de los píxel construir una geometría virtual.

Para facilitar el proceso cuando se dispone de gran número de puntos de referencia, el programa permite reconocer estos a partir de un umbral de intensidad gracias al submenú (P) "Reference points".

Para estimar el error absoluto de la transformación, se deben comparar las coordenadas de la transformación con las topográficas de puntos no involucrados en la transformación. El error relativo cometido dará cuenta de la precisión con que se trabaja. Es conveniente que los puntos estén uniformemente distribuidos para evitar zonas con grandes errores por la falta de puntos de referencia cercanos.

Una vez realizada la transformación, para cada píxel en que se posicione el cursor, DigImage ofrece las coordenadas en el sistema de píxel, topográfico (e.g. UTM) y local respecto a puntos de referencia.

TRANSFORMACIÓN POLINÓMICA

La inclinación de la cámara, la deformación de la lente gran angular, el ángulo de inclinación respecto de una vista cenital y la curvatura terrestre son causas de distorsión entre las coordenadas topográficas y las coordenadas matriciales de los puntos de la imagen, "píxels".

La transformación polinómica es muy usada en el campo de teledetección espacial, ya que la curvatura terrestre es perceptible y se dispone de gran número de puntos fiduciales. También es muy efectiva para imágenes captadas con gran angular.

Por ejemplo, para una transformación bicuadrática como la que emplea K_d son necesarios ocho puntos.

$$X_{wc} = A_1 + A_2 X + A_3 Y + A_4 X Y + A_5 X^2 + A_6 X Y^2 + A_7 X^2 Y + A_8 X Y^2 \quad \text{Ec. 5-21}$$

$$Y_{wc} = B_1 + B_2 X + B_3 Y + B_4 X Y + B_5 X^2 + B_6 X Y^2 + B_7 X^2 Y + B_8 X Y^2 \quad \text{Ec. 5-22}$$

Los datos necesarios para la transformación de coordenadas correspondiente a las imágenes del globo y la superposición de la malla de la transformación inversa sobre la imagen se muestran en la figura 5.4.

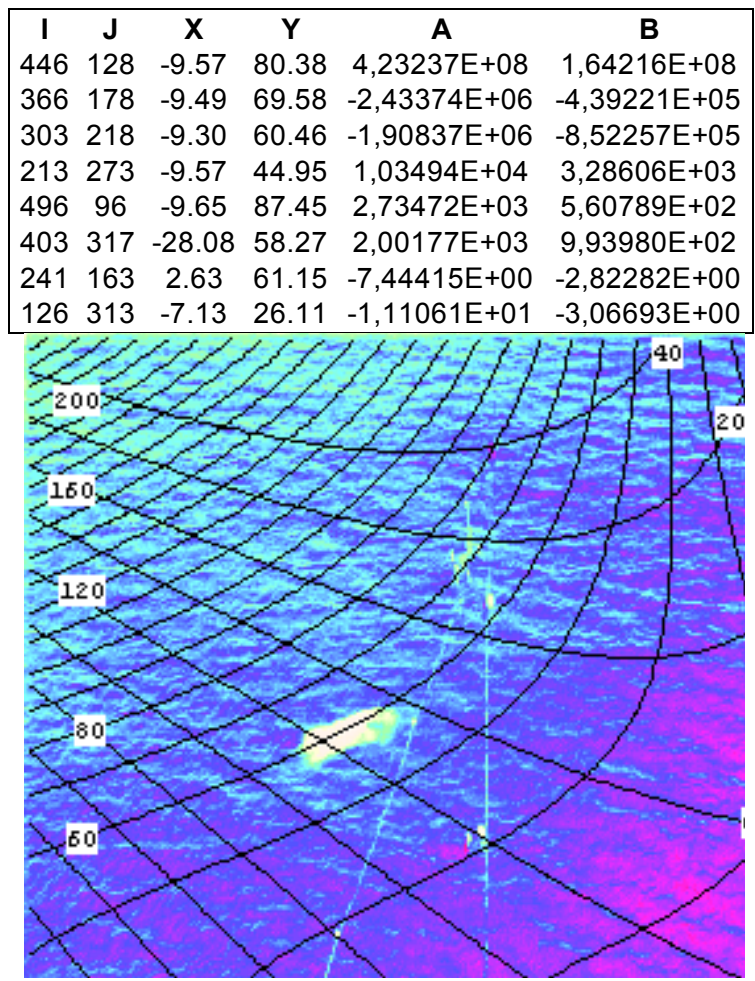


Figura 5-4. Datos y malla de Transformación de coordenadas superpuesta. Caso del globo.

APROXIMACIÓN TOPOGRÁFICA

En la ingeniería marítima de campo cercano, cuando se puede despreciar la curvatura terrestre, no se emplea gran angular y el número de puntos fiduciales es restringido son más fiables los principios de la fotogrametría.

Geoméricamente se puede derivar la relación entre la proyección en el plano de la cámara y una superficie como la mostrada en la figura 5.5. Suponiendo que el centro de la cámara (x_c, y_c, z_c), el centro de la imagen (i₀, j₀) y el punto de enfoque (x_p, y_p, z_p) están alineados y siendo los ángulos de rotación (α, γ, τ), se derivan las ecuaciones de colinealidad:

$$i-i_0 = -C_i (m_{11} (x-x_c) + m_{12} (y-y_c) + m_{13} (z-z_c)) / (m_{31} (x-x_c) + m_{32} (y-y_c) + m_{33} (z-z_c)) \tag{Ec. 5-23}$$

$$j-j_0 = -C_j (m_{21} (x-x_c) + m_{22} (y-y_c) + m_{23} (z-z_c)) / (m_{31} (x-x_c) + m_{32} (y-y_c) + m_{33} (z-z_c)) \tag{Ec. 5-24}$$

$$m_{11} = \cos\alpha \cos\tau + \sin\alpha \cos\gamma \sin\tau \tag{Ec. 5-25}$$

$$m_{12} = -\sin\alpha \cos\tau + \cos\alpha \cos\gamma \sin\tau \tag{Ec. 5-26}$$

$$m_{13} = \sin \gamma \cos \tau \quad \text{Ec. 5-27}$$

$$m_{21} = -\cos \alpha \sin \sigma + \sin \alpha \cos \gamma \cos \tau \quad \text{Ec. 5-28}$$

$$m_{22} = \sin \alpha \sin \tau + \cos \alpha \cos \gamma \cos \tau \quad \text{Ec. 5-29}$$

$$m_{23} = \sin \gamma \cos \tau \quad \text{Ec. 5-30}$$

$$m_{31} = \sin \alpha \sin \gamma \quad \text{Ec. 5-31}$$

$$m_{32} = \cos \alpha \sin \gamma \quad \text{Ec. 5-32}$$

$$m_{33} = -\cos \gamma \quad \text{Ec. 5-33}$$

$$C_i = f / \lambda_i \quad y \quad C_j = f / \lambda_j \quad \text{Ec. 5-34}$$

donde f es la distancia focal efectiva y λ_i, λ_j son los factores de escala.

En estas ecuaciones hay 11 parámetros intrínsecos: $(x_c, y_c, z_c, i_0, j_0, \phi, \tau, \sigma, f, \lambda_i, \lambda_j)$, de manera que para su resolución son necesarios 6 puntos fiduciales.

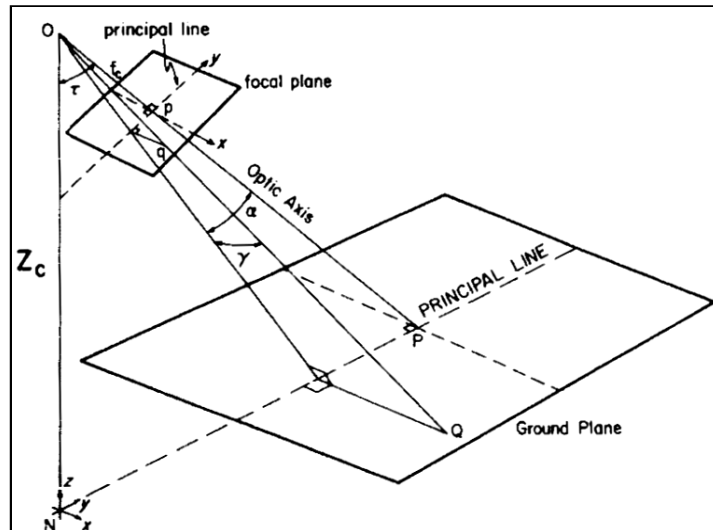


Figura 5-5. Esquema de la relación entre el plano de la imagen y el del terreno.

Las ecuaciones se pueden simplificar de la siguiente forma:

$$i = (L1x + L2y + L3z + L4) / (L9x + L10y + L11z + 1) \quad \text{Ec. 5-35}$$

$$j = (L5x + L6y + L7z + L8) / (L9x + L10y + L11z + 1) \quad \text{Ec. 5-36}$$

En el mar es posible tomar puntos de referencia con marcas de GPS pero su captación es difícil ya que supone una gran coordinación entre los medios de navegación y los de filmación. Sin embargo, en el mar se puede hacer una hipótesis adicional que permita resolver el sistema de ecuaciones. A una escala de pocos Km se puede suponer que la superficie media del mar es horizontal, $z=0$.

$$i = (L1x + L2y + L4) / (L9x + L10y + 1) \quad \text{Ec. 5-37}$$

$$j = (L5x + L6y + L8) / (L9x + L10y + 1) \quad \text{Ec. 5-38}$$

quedando solo 8 incógnitas que requieren 4 puntos fiduciales para su resolución.

Si es posible tomar más puntos, se emplea un método iterativo de ajuste por mínimos cuadrados para obtener los coeficientes óptimos. Para esta tesis se desarrolló un pequeño programa Fortran para su cálculo (Gauss.for).

La bondad del grado de ajuste se mide por la importancia de los residuos, la diferencia entre el valor estimado y el real. Para valorarlo, se puede tomar como indicador el promedio del error medio cuadrático (RMS) para cada uno de los puntos de control. Pruebas realizadas en laboratorio para calibrar el programa Gauss.for con una imagen de una cuadrícula de 40x40cm del suelo permitieron obtener un error inferior al 1% (figura 5.6).

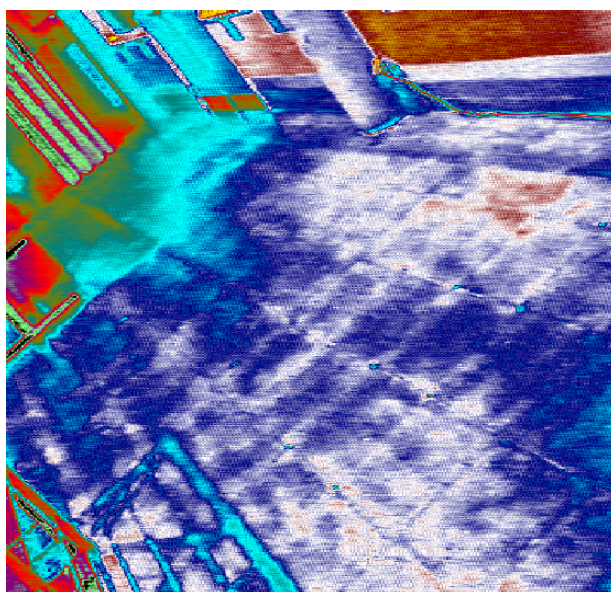


Figura 5-6. Imagen de una retícula del suelo para calibrar la transformación.

Los datos de calibración de la imagen 5.6 son los siguientes:

X(i),	Y(i),	I(i),	J(i)
100.00	100.00	409.00	260.00
140.00	100.00	331.00	315.00
180.00	100.00	255.00	367.00
220.00	100.00	183.00	415.00
100.00	140.00	375.00	232.00
140.00	140.00	305.00	282.00
180.00	140.00	238.00	330.00
220.00	140.00	174.00	378.00
100.00	60.00	454.00	294.00
140.00	60.00	360.00	350.00
180.00	60.00	277.00	410.00
220.00	60.00	195.00	466.00

Tabla 5-1. Datos de calibrado de la imagen de la Figura 5.6..

De estos datos se extraen los parámetros básicos de la transformación:

- Punto principal X_p, Y_p 1.882982 -1.339014
- Distancias principales C_x, C_y 2.198830 1.551061
- orientación $AngX, AngY, AngZ$ 76.021550 -2.049378E-02 119.669900

Es importante tener en cuenta que todas las transformaciones en los bordes de la imagen pueden producir errores importantes, por lo que es recomendable no tener en consideración al menos el 10% periférico.

5.4.3 Selección de las imágenes a analizar.

Para el análisis hay que digitalizar una serie de imágenes instantáneas. El ordenador las captura en formato digital con distintos modos, simple o secuencial, a un tiempo fijo o con cierto retraso. Todos ellos se recogen en el submenú (G) "Grab and Display Menu" de DigImage. Dentro del modo secuencial permite almacenar hasta 16 imágenes distintas en "buffers" (espacios de memoria extendida). El "buffer" es el que usa el programa para almacenar información temporal, por lo que es posible perder o sobrescribir la imagen que se guarde en él. El control de adquisición de las imágenes puede ser manual o por ordenador. La resolución temporal de la adquisición es de 5rHz , por lo que este es el mínimo intervalo admisible entre dos imágenes.

En experimentos con algún parámetro cíclico, como el oleaje, puede ser interesante hacer previamente una serie temporal de una fila y/o columna para determinar su periodo y tomar la secuencia con ese período (véase en el apartado de técnicas de análisis, series temporales (T)(L) "Time series of line and/or column").

Para visualizar los "buffers" por la pantalla del televisor debe estar en modo RGB; alternativamente están el modo Line A y Line B, por los que se visualizan las entradas correspondientes a los magnetoscopios, las imágenes reales del vídeo.

Si se desea cambiar de "buffer" no hay más que mover los cursores hacia arriba o hacia abajo, siempre que se esté en el menú (G). También se pueden visualizar por el monitor del ordenador con el modo (G)(D) "Display sequence of buffers". Puede ser interesante mostrar los "buffers" de forma seguida a modo de película. Ésta se puede crear y reproducir con las aplicaciones del menú (T)(M) "Movies".

Para mejorar la visualización se pueden hacer aumentos o "zoom". Esto no supone una mayor resolución sino que se aumenta o disminuye el tamaño del píxel. Para ello se ha de ir al submenú (G)(Z) "Zoom". Aparece una cruz en la imagen que se ha de posicionar en el centro de la zona que se desee ampliar mediante el ratón o con los cursores. Éstos permiten un movimiento de píxel en píxel o más rápido (de 16 en 16), marcando la tecla (S) "Speed toggle". Si se vuelve a marcar (S) se mueve de uno en uno. Una vez colocados en la zona, marcando sucesivamente la tecla IMÁGENES "Enlarge" se va ampliando la imagen hasta 8 veces su tamaño. Para condensarlo, no hay más que marcar la tecla IMÁGENES "Condense" tantas veces como se quiera, hasta volver a la imagen inicial. Por la pantalla del ordenador sale la posición del cursor en coordenadas píxel, reales, reales relativas y polares; además de la intensidad del píxel, la intensidad media de la zona y su desviación.

Las imágenes tienen una resolución de 512 * 512 puntos o "píxels" de manera que suponen matrices muy grandes para su análisis. Trabajar con ellas tiene un coste computacional considerable. Además, normalmente, el interés se centra en una zona concreta pudiendo depreciarse el resto. Por ello conviene trabajar con partes o "ventanas" de dichas imágenes, como el ejemplo de la figura 5.7. Al guardar estas ventanas, DigImage muestra en pantalla las coordenadas de la esquina superior

izquierda y de la inferior derecha. Conviene guardar estos datos para saber el tamaño y ubicación de la ventana e introducirlos en los ficheros de lectura de datos.

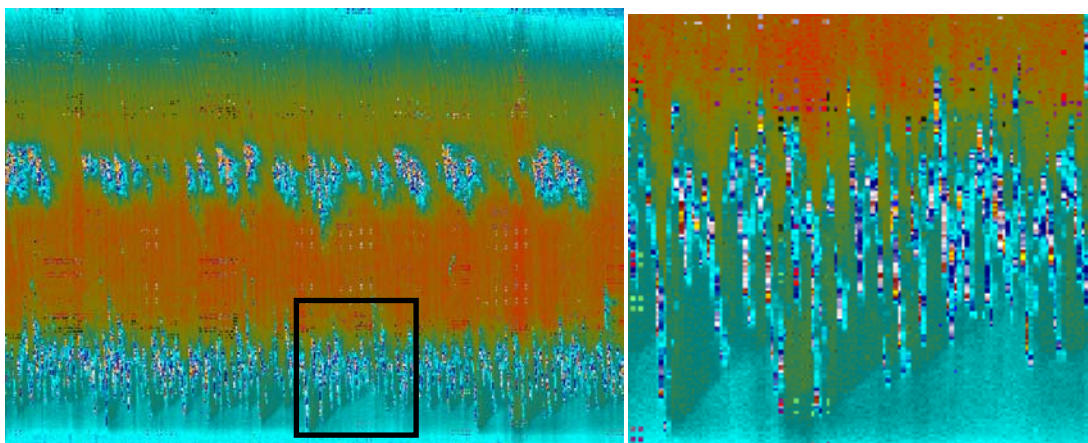


Figura 5-7. Imagen completa digitalizada y Ventana ampliada de la imagen anterior.

Una vez se tienen los “buffers”, se pueden visualizar con distintas escalas de falso color de forma que se obtenga un contraste adecuado. Las escalas de falso color otorgan distintos colores a cada franja de intensidad. El rango de intensidades tiene una resolución de 256 niveles de gris. Hay definidas 16 escalas de falso color a las cuales se accede con el modo (G)(O) “Output Look Table “. Entre ellas está la posibilidad de Blanco y Negro y la del negativo. Para obtener una barra con la escala de intensidad, se ha de salir del submenú y entrar en el (G)(I) “Display intensity scale”.

En una misma pantalla se pueden presentar varias ventanas. De este modo se puede hacer un mosaico de ventanas para observar su evolución y compararlas. El mosaico se puede conseguir de forma automática con la aplicación (G)(J) “Display summary “buffers”automatic” en cuyo caso colocará, en una cuadrícula de tamaño a elegir 2*2, 3*3 o 4*4, por orden los “buffer” almacenados empezando por el que se indique. También permite hacerlo alterando el orden con (G)(L) “Display summary buffers specific”. También se puede construir un mosaico irregular a base de restaurar ficheros de ventanas y colocarlos en distintas posiciones de un mismo “buffer”, opción (K)(L) “Load window fram file” para ficheros.PIC y, opción (K)(B) “Load window 3.x.BMP bit map” para ficheros.BMP.

Tanto la recuperación como el almacenamiento de las imágenes se encuentra en el submenú (K) “Save and restore buffer”.

Para salvar los “buffers” o ventanas de éstos, hay distintas opciones según el tipo de archivo en el que se quiera salvar:

- Fichero.PIC opción (K)(S) “Save buffer to file” o (K)(W) “Write window to file” para una ventana.
- Fichero.BMP opción (K)(C) “Save window 3.x.BMP bit map”. En este tipo de archivo la imagen puede ser reescalada de forma que quede con las proporciones deseadas.

Así mismo se pueden recuperar “buffers” de un archivo.

- Del tipo fichero.PIC opción (K)(M) “Restore buffer to file” o (K)(L) “Load window to file” para una ventana
- Del tipo fichero.BMP opción (K)(B) “ Load window 3.x.BMP bit map”.

Si se han capturado de modo secuencial, se salvan automáticamente como fichero.PIC y con una numeración sucesiva en la extensión, mediante la opción (K)(Y) "Save all buffers" para salvarlos y opción (K)(X) "Load all buffers" para recuperarlos.

5.4.4 Correcciones para eliminar efectos no deseados

A continuación se explica el proceso que se sigue para la eliminación de cada uno de los principales efectos no deseados y/o las correcciones necesarias para preparar las imágenes de forma que se pueda hacer un análisis cualitativo y cuantitativo.

ELIMINACIÓN DEL FONDO

Existe la posibilidad de corregir el efecto que pueden producir una iluminación no uniforme o variaciones del fondo. Esto es de especial utilidad en el caso de estudiar concentración de manchas a partir de la intensidad de luz absorbida al pasar por ella.

DigImage tiene una opción específica para el caso de manchas. (E) "Enhance images" – (D) "Correct dye for background variations". Realiza un ajuste, lineal o logarítmico según se prefiera, entre las intensidades de un "buffer" sin mancha y las de la mancha. También permite calibrar el cero de intensidad.

Se puede separar la mancha del fondo a partir de una imagen sin mancha con una manipulación aritmética de imágenes, opción (G)(M) "Manipulate image", es decir, restando las intensidades de los píxeles correspondientes a cada una.

Si no es posible tener una imagen del fondo, se puede hacer un ajuste polinómico del fondo con IMÁGENES(F) "Fit polynomial to background".

Kd lo realiza aplicando un factor de corrección a toda la mancha. Éste se obtiene por interpolación de una función polinómica en la evolución de la intensidad máxima de la mancha.

AISLAR UNA CELDA SEGÚN UN CONTORNO DE INTENSIDAD CONSTANTE

Mediante DigImage se ha de seguir un proceso para aislar una zona de interés. Ésta ha de venir definida por un contorno de intensidad o se ha de construir por sucesivos contornos de intensidad por zonas o ventanas. A continuación se describen los pasos necesarios para ello:

- El primer paso es ver la imagen posicionándose en los distintos puntos del contorno para tratar de elegir una intensidad de corte, opción (G)(Z) "zoom" & pan/locate positions".
- Después hay que localizar los contornos con esa intensidad de corte que haya en la ventana de interés, opción "Contours".
- Una vez vistos los contornos se seleccionan el o los que interesen para que se guarden los datos en un fichero.DAT con la opción "Locate edge in window".
- Se crea una máscara, es decir una zona blanca o de intensidad 255 en un fondo negro o de intensidad r, según contornos definidos por isolíneas de intensidad, opción (M) " Produce contour mask buffer".

- En el caso de que se desee el fondo, se puede invertir la escala de intensidades con la opción (G)(M)(I) “Invert buffer”.
- Una vez creada la máscara, se aplica con la opción (G)(M)(K) “Use mask buffer”.

En el caso de trazadores, TICE y Kd permiten aislar una mancha a partir de una intensidad de corte de forma directa; Kd después de un filtrado por variaciones del fondo mediante factores de corrección. Toda intensidad inferior a ésta es considerada nula y las superiores se asemejan a la concentración de trazador.

CORRECCIÓN DE PERTURBACIONES LOCALES.

Es frecuente la presencia de perturbaciones locales como manchas en el visor de la cámara de grabación, reflejos o espuma en el agua, que alteran el campo de intensidades. Para su filtrado, DigImage ofrece la opción IMÁGENES(I) “Remove small islands”, en la que se han de localizar una a una las regiones con intensidad menor y mayor a un umbral y, si encierra un área menor a la especificada, la rellena con la intensidad del contorno. Pero no ofrece ninguna aplicación que permita cambiar un píxel, de forma que es necesario recurrir a otros programas específicos.

Tanto TICE como Kd permiten variar la intensidad de un píxel a partir de las coordenadas matriciales relativas al extremo superior izquierdo de la ventana.

ELIMINACIÓN DEL EFECTO DE ENTRELAZADO

Muchos magnetoscopios operan en modo entrelazado. Esto significa que una imagen, o “frame”, se produce por dos campos de vídeo. El primero en transmitirse contiene todas las líneas pares, y el segundo todas las impares. Para cada “frame”, a 25 o 30 Hz, hay dos campos, a 50 o 60 Hz. Normalmente, el obturador de una cámara de vídeo está abierto en un ciclo igual que el campo y la información que contiene corresponde a tiempos ligeramente distintos. Si el flujo evoluciona rápidamente, esta pequeña diferencia de tiempo puede suponer un cambio importante de la imagen. Un reflejo en ella indica esta situación. Para evitarlo hay que considerar un solo campo en el “frame”, el par o el impar, filtrando el otro o bien hacer un promediando entre ambos, que se puede hacer en toda la imagen o en una ventana. DigImage tiene un submenú específico (F)(I) “Interlace filters”.

CORRECCIÓN DE LA ESCALA DE INTENSIDADES

El caso más sencillo es aquél en el que sólo se quiere ajustar el rango de intensidades a un intervalo mediante un re-escalado lineal, opción IMÁGENES(L) “Linear intensity changes”. Pregunta los coeficientes de la transformación ($p=a+bp$), siendo “a” la intensidad correspondiente al negro (imágenes por defecto) y “b” el factor de reescalado (por defecto (1) deja la escala de intensidades entre r y 255). También se puede hacer de forma automática, en base al rango de intensidades de una ventana especificada, con la opción (D)(I) “Alter intensity range for dumping”.

DigImage dispone de un submenú (P)(I) “Intensity calibrations” que permite relacionar intensidades digitales con las absolutas y con otros campos externos asociados a éstas, como la concentración de un trazador.

Una manera consiste en elaborar una escala de intensidades y/o concentraciones a base de ventanas a las que se les asigna un valor de intensidad y de concentración determinados. Primero se ha de inicializar la serie con (P)(I)(I) "Initialise intensity mapping", después se localizan las ventanas con (P)(I)(L) "Locate intensity reference" y por último se aplican a una imagen con (P)(I)(T) "Transfer intensities to new image". Si posteriormente se quieren cambiar los valores, se puede hacer con (P)(I)(U) "Update reference intensities manually" para las intensidades y con (P)(I)(V) "Update reference concentrations" para las concentraciones.

También permite hacerlo mediante funciones 2D. El tipo de función se introduce como una sucesión de términos, especificados según el tipo de función deseada, por unos coeficientes de ajuste. Los términos los introduce el usuario y los coeficientes de ajuste los calcula el programa. Para introducir la expresión del mapa de intensidades se ha de escoger la opción (P)(I)(M) "Mapping function for pixel intensities" y para el de concentraciones la opción (P)(I)(N) "Mapping function for concentrations".

SUAVIZADO DE LOS CONTORNOS

Para uniformizar variaciones locales y suavizar los contornos de la imagen se puede aplicar un filtro de paso bajo a una convolución que reemplaza la intensidad de un píxel por una combinación lineal de las de su entorno. El menú de DigImage ofrece distintos filtros de convolución en (F) "Convolution filters":

- Filtro de bajo paso, paso alto o laplaciano.
- Con matriz predefinida que pondera con 5 píxels, opción (1) o 9, opción (2), o por definir como un número de filas por columnas, opción (L).

También permite introducir una combinación lineal para filtrar, opción (U).

5.5 TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LAS IMÁGENES

Hay numerosos parámetros, que si presentan evidencias visuales, se pueden cuantificar con un adecuado análisis de las imágenes previamente tratadas. En caso negativo, se pueden emplear trazadores que visualicen el efecto, por ejemplo boyas o manchas.

5.5.1 Coordenadas de puntos

Como se ha visto en el apartado de transformación de coordenadas, es posible establecer un sistema de coordenadas reales a partir de cierto número de puntos fiduciales. De esta manera se pueden saber las coordenadas de cualquier punto de la imagen y, por diferencia, la distancia relativa y longitudes características del contenido de la imagen, es decir, su geometría. Los datos del punto como intensidad, coordenadas píxel, reales, relativas y polares se pueden guardar en un fichero.DAT, que puede ser nuevo o viejo, permitiendo acceder al fichero y luego seguir añadiendo más puntos, opción (P)(P) "Determine the coordinates of a point" y con IMÁGENES(P) "Points with additional data" se permite introducir comentarios a posteriori. Además, identificando píxels de distintas imágenes, es posible determinar trayectorias de puntos especificados y el cálculo de sus velocidades.

La posición de un objeto en la imagen es función de la orientación de la cámara respecto al terreno y de las características ópticas de la cámara. Las ecuaciones no están bien definidas, pues se ve un campo 3-dimensional en una imagen plana. Por ello es necesario añadir información o dejar la coordenada vertical como incógnita. En la costa se puede asumir como coordenada vertical el nivel del mar.

El proceso de rectificación o transformación de coordenadas consiste en una serie de cálculos geométricos para asociar una posición topográfica (x,y,z) a cada elemento o píxel de la imagen (I, J). Las teorías en que se fundamenta este proceso fueron desarrolladas por Lippman y Holman (1989). Para establecer esta relación es necesario conocer los parámetros ópticos de la filmación:

- τ ángulo entre el eje óptico de la cámara y la vertical
- f_c distancia focal
- α ángulo cenital respecto al eje óptico de cada punto
- γ ángulo acimutal respecto el eje óptico de cada punto

$$XQ = Zc \tan (\gamma) / \cos (\tau + \alpha) \quad \text{Ec. 5-39}$$

$$YQ = Zc \tan (\tau + \alpha) \quad \text{Ec. 5-40}$$

$$\alpha = \arctan (yq / fc) = \arctan (xq / (yq^2 + fc^2)^{1/2}) \quad \text{Ec. 5-41}$$

Los parámetros visuales referentes a cada punto se pueden deducir a partir de otros más sintéticos:

- δ ángulo del dominio visible de la cámara
- ϕ ángulo acimutal de rotación entre los sistemas de coordenadas
- θ ángulo cenital de la cámara respecto al horizonte

La valoración de estos parámetros en campo es muy difícil. Usualmente están sometidos a errores de unos 0.25° en τ , 0.5° ϕ y 0.5% en f_c .

Se llaman cámaras paramétricas a aquellas en que se conocen con exactitud sus parámetros ópticos τ , δ , ϕ y θ , como las empleadas en los servicios de cartografía. En el caso de disponer de cámaras no paramétricas, la restitución se puede realizar a partir de puntos de control del terreno GCP (Ground control Point). Por cada punto se obtiene dos relaciones (U, V) vs. (x, y, z). Las coordenadas (U, V) de un píxel de la pantalla están referidas a un sistema con origen en la esquina superior izquierda con eje U vertical descendente y V horizontal diestro. Para cada píxel se realiza una transformación por triangulación basada en la aproximación de Walton:

$$U = (A x + B y + C z + D) / (E x + F y + G z + 1) \quad \text{Ec. 5-42}$$

$$V = (H x + K y + L z + M) / (E x + F y + G z + 1) \quad \text{Ec. 5-43}$$

Estas expresiones contienen once coeficientes de forma que son necesarios seis puntos para resolver el sistema. En el caso de cámara paramétrica se dispone de siete relaciones, por lo que con dos puntos de control es suficiente (un origen y una orientación).

Para obtener un óptimo ajuste se suelen tomar más puntos de control de los estrictamente necesarios. Con cada conjunto de seis se obtiene una serie de coeficientes, de forma que es posible establecer varias geometrías. Para elegir la

mejor se compara la forma y posición de los picos de intensidad de un perfil transversal a la orilla. Se descartan aquellas geometrías que se desvíen mucho de la media y se promedia el resto o se toma aquella cuya suma de diferencias sea inferior.

Para valorar el error relativo, se compara la posición estimada de los puntos de control no empleados en la restitución con la posición real.

La resolución espacial es el área abarcada por un único píxel. El dominio se divide en una matriz de 640*480 celdas o píxels. La resolución no es la misma en toda la pantalla, pues la transformación de coordenadas puede acumular más puntos en unas zonas que otras, en particular cerca del horizonte, ni en todas las direcciones. Para hacerse una idea global de la resolución, se pueden representar las trayectorias conocidas como por ejemplo una cuadrícula (x, y) o viceversa de la rectificación de una cuadrícula (U, V).

5.5.2 Interpretación gráfica

Para analizar la estructura interna del contenido de la imagen puede ser necesario localizar y trazar isolíneas de intensidad. DigImage dispone del menú “Contours and edges” con distintas herramientas para elaborar mapas de curvas de nivel.

El primer paso es visualizar todos los contornos de una intensidad especificada, opción “Contours”. Para evitar pequeñas islas se especifica un número mínimo de píxels que ha de contener el contorno. De los contornos que interesen se puede:

- Guardar las posiciones en un fichero.DAT con la opción “Locate edge in window”. Si se quiere guardar algún punto de interés, como el centro del contorno, se puede hacer con la opción (P) “Points with additional data”. Además dispone de espacio para añadir a posteriori comentarios.
- Ajustar una curva al contorno por mínimos cuadrados con la opción (G) “Fit curve to contour”.
- También permite rellenar el contorno con una intensidad especificada, opción (F) “Fill to contour”. Repitiendo el proceso se puede obtener un mapa de curvas de nivel representado con franjas de color.

Por otro lado, se pueden representar gráficas de intensidad de distintas secciones. Se puede tratar de la fila y columna correspondientes a una posición especificada, opción (S) “Plot intensity sections”, o de una curva parametrizada por fórmulas de los ejes, en coordenadas reales o píxel, en función de la longitud de la curva opción (L) “Intensities along a line”. También incluye la posibilidad de representación tridimensional, opción (T) “Three-dimensional intensity plot”.

5.5.3 Series temporales

Una de las aplicaciones más potentes de DigImage es la obtención de series temporales de una línea o columna fija de la pantalla, opción (T)(L) “Time series of line and/or column”. De esta forma, se logra una representación en la que un eje corresponde al tiempo y el otro a la coordenada correspondiente a la fila o a la columna (figura 5.8).

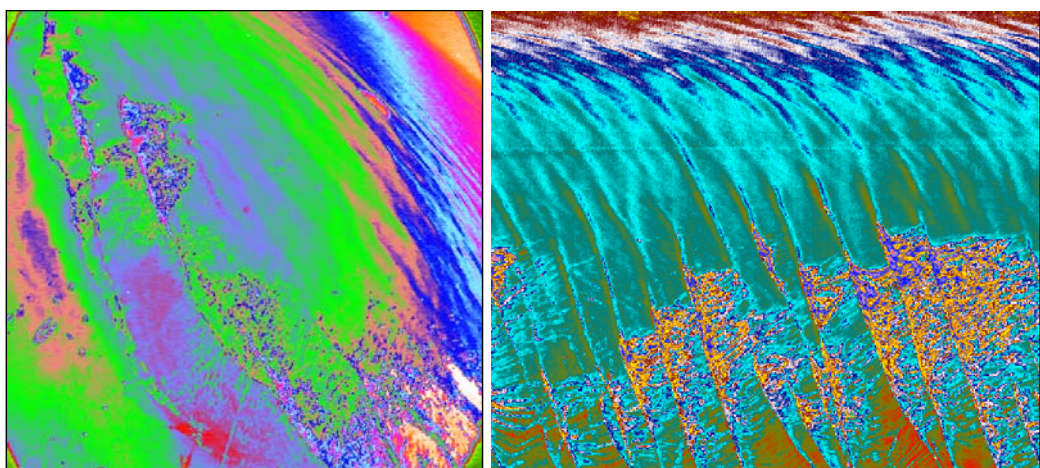


Figura 5-8. Serie temporal de una fila y 511 segundos.

En estas representaciones es posible cuantificar el período como un intervalo entre sucesos y la velocidad como una pendiente. Esto supone un gran avance, pues permite obtener datos indirectos en zonas de difícil medición, como la orilla de la playa. Se pueden calcular campos de velocidad reales realizando este proceso para cada fila o cada columna.

También permite cuantificar la evolución de las características geométricas de la imagen, como por ejemplo la evolución del tamaño de una mancha o de la zona de rompientes.

Además, se puede identificar la evolución del punto de rotura y cuantificar la fracción de olas rotas, pues al romper se produce espuma, efecto muy apreciable visualmente. Por otro lado, DigImage ofrece la posibilidad de seguir la evolución de uno o varios puntos y guardar los resultados en un fichero, opción (T)(P) "Time series at single point(s)". Análogamente, permite localizar y seguir la trayectoria del punto de intensidad media de una ventana seleccionada.

5.5.4 Promediado temporal

Puede resultar interesante realizar el promediado temporal de un intervalo de la filmación para determinar, por ejemplo, la línea de orilla o el ancho de la zona de rompientes, para trazar la pluma ficticia generada por un trazador o para promediar el efecto de la inclinación de la superficie por el oleaje. Este proceso, DigImage lo realiza automáticamente con todas las imágenes, o una ventana de éstas, de un intervalo de tiempo especificado, opción (T)(A) "Average of time series", o con una sucesión de algunas en determinados intervalos de tiempo, opción (T)(P) "Time series at single points", para casos en que el campo visual sea variable. En el caso de que se desee promediar una serie muy larga, se pueden hacer series parciales y después promediar los "buffers" correspondientes con (C)(A) "Average of buffers" si se hace la media aritmética y (C)(A) "RMS average of buffers" para la media cuadrática. En la figura 5.9 se muestra un ejemplo de la pluma ficticia resultante del promediado de una mancha.

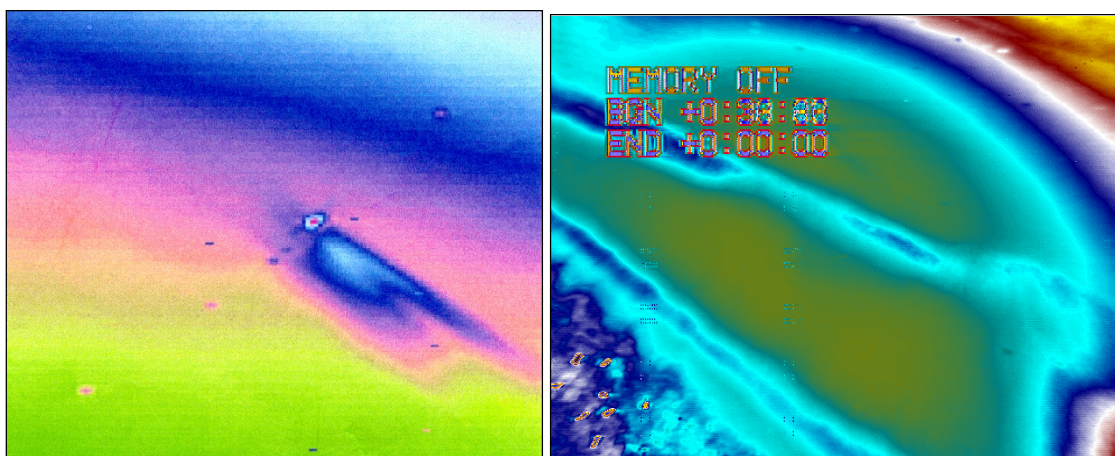


Figura 5-9. Imágenes de una mancha (izq) y de la zona de rotura (der) promediadas 5 minutos

5.5.5 Estadísticos

Dado que en el análisis de imágenes se trabaja con ficheros de datos muy grandes, necesariamente su estudio recurre a la estadística para su interpretación. Por ejemplo:

- Determinación del centro geométrico y del centro de gravedad de una celda definida por una isolínea de intensidad, mediante la opción (L)(B) “Blobs” para una sola imagen o con (L)(T) “Track centroids in array” para varias, y de forma directa con TICE y Kd, ya que éste es uno de sus resultados.
- Intensidad media por filas y/o columnas. La opción (L)(M) “Intensity means for lines/columns” realiza una media aritmética de las intensidades de los píxeles de cada fila y/o columna.
- Estadística de los segmentos que queden bajo y sobre un cierto umbral de intensidad. La opción (L)(L) “Line statistics” calcula la longitud de los segmentos horizontales y verticales que queden dentro y fuera, su media y desviación estándar.
- Longitudes características de una celda. Mediante la opción de DigImage (L)(N) “Integral mixing length scale” se puede determinar la longitud ponderada por la concentración, según los ejes de la ventana. Las longitudes absolutas longitudinal y transversal, se calculan con Kd.
- Varianza de dimensiones principales. El coeficiente de difusión se puede calcular como un medio de la derivada temporal de la varianza de la dimensión de la mancha en una dirección. DigImage dispone de la opción (L)(O) “Moments of intensity” para determinar los momentos de intensidad de las filas y/o columnas contenidas en una ventana, pero para determinar las varianzas en la dirección longitudinal y transversal de una mancha (en el caso de que no coincidan con los ejes de la imagen) es necesario recurrir a TICE.
- Correlación entre dos imágenes. La opción (L) “Cross correlation of two images” permite calcular la correlación cruzada entre dos imágenes en función de la posición del píxel. También se puede producir un gráfico de las

intensidades de cada píxel en ambas, los de una imagen en el eje horizontal y los de la otra en el vertical, con (L)(I) “Scatter plot of intensities for two images”. Después se puede evaluar la translación local necesaria para maximizar la semejanza entre ambas con (L)(S) “Shift to minimize differences” o con (L)(P) “Particle image velocimetry” si se quiere precisión a nivel de subpíxels. Haciendo el cociente entre translación e incremento temporal entre las imágenes se obtienen velocidades.

- Distribución de la concentración de una mancha. Para calcular dispersiones se asume que la distribución de la concentración es normal. Esta hipótesis hay que comprobarla mediante histogramas de intensidad “Intensity histogram” de una ventana que contenga la mancha. Esto también es útil para evaluar el rango y la escala de intensidades de cara a reajustes “Histogram equalisation” o para ver si hay saturación de algunos intervalos. Vease el ejemplo de histograma de la figura 5.10.

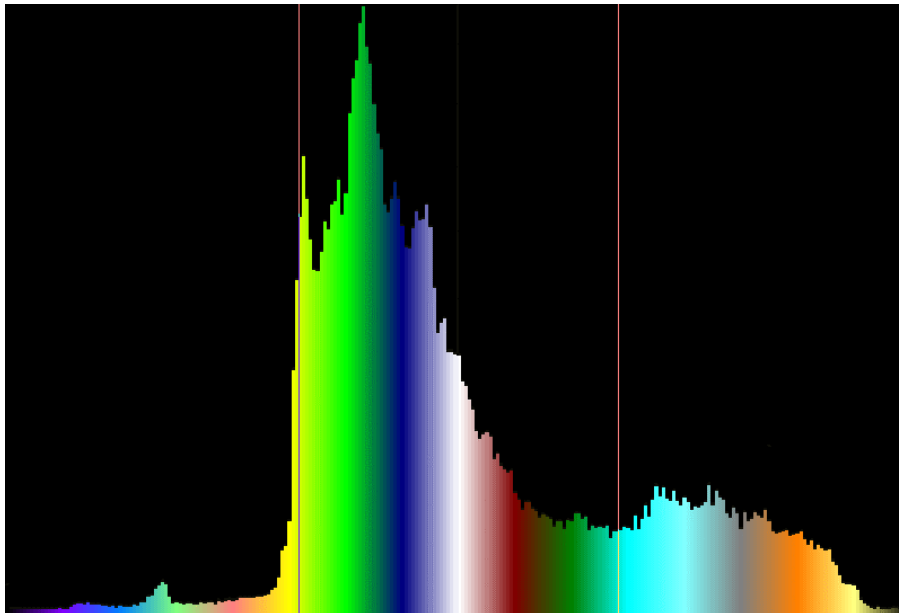


Figura 5-10. Histograma de intensidades

5.5.6 Análisis espectral

Es posible realizar un análisis espectral mediante series temporales de imágenes. Se ha comprobado, comparando espectros correspondientes a un sensor de altura de ola y a intensidades de una serie temporal, que hay una correspondencia entre los picos como se verá en el capítulo 7. Otra correlación es la que se puede adoptar entre la pendiente de la superficie de onda y la intensidad. Otro indicador de altura de ola es la variación en la línea de orilla, el runup+setup, parámetro identificable visualmente.

El análisis espectral es adecuado cuando las series tienen una longitud suficientemente grande respecto a la mínima frecuencia característica tratada y una resolución en el intervalo de muestreo, suficientemente pequeña frente a dicha frecuencia.

Para realizar un análisis espectral escalar de series temporales existen tres técnicas convencionales: Blackman-Tukey, Transformada rápida de Fourier (FFT) y el método

de máxima entropía (MME). Rodríguez y Jiménez (1994) demuestran que los parámetros obtenidos con los tres métodos no difieren mucho. El método más ampliamente usado, por su estabilidad y precisión, es el FFT. En cambio, para espectros direccionales no es tan simple el cálculo.

El método FFT emplea un periodograma de la densidad espectral $S_f(f_i)$ correspondiente a cada frecuencia f_i . Se define a éste como el cuadrado de la transformada de Fourier de la serie temporal y_t .

Hay diversos programas que permiten hacer un análisis espectral como: V-sas (LIM-UPC, Gómez, 1993), Statgrafics o Spectral (Aalborg University). La diferencia entre unos y otros es su flexibilidad de tratamiento en la serie temporal (e.g. ventanas o "tapering" de los datos), y tipo de salida. También es una de las opciones de DigImage (S) "Spatial FFT", que permite hacerlo en una dimensión con toda la resolución (opción 1), o 2D con una resolución de 256*128 (opción 2).

5.5.7 Análisis fractal

La capacidad de los satélites ERS-1/2 para monitorear un área grande permite revelar el cambio de la rugosidad de la superficie mar para detectar y clasificar los diferentes fenómenos hidrometeorológicos.

También es importante el factor de persistencia del trazador en el medio, ya que con el tiempo, y sobre todo a escalas más pequeñas, el campo de velocidades tiende a adveccionar y difundir de forma caótica al trazador (sea este petróleo de origen antropogénico o tensoactivos naturales asociados al plancton). Para manchas de petróleo de gran persistencia (días o semanas, lo que implica un accidente grave), su dimensión fractal tenderá a la del medio turbulento; sin embargo, para la mayoría de los vertidos intencionados su poca persistencia de horas o pocos días, hacen que su dimensión característica sea aproximadamente euclídea, $D = 1$.

Los vertidos de petróleo, así como otros procesos físicos y biológicos que producen cambios en las ondas capilares de la superficie del océano, son detectados debido a la disminución de la reflectividad de la superficie del océano, producida por cambios de la tensión superficial así como la disminución del oleaje debido a la formación de una microcapa tensoactiva.

Realizando un análisis fractal es posible conocer características de la tensión superficial del vertido y, por tanto, clasificar el tipo de sustancia, por ejemplo saber si se trata de un hidrocarburo o de una masa de plancton. Las manchas de petróleo o aceite, por su elevada tensión superficial y viscosidad, tienden a producir contornos suaves, de menor dimensión fractal $D_2 = 1,1-1,2$ que la asociada a la turbulencia $D_2 = 1.4$. Otro parámetro importante es la distribución de la dimensión fractal (multifractal) para los diversos niveles de intensidad de las imágenes SAR, (Ver Gade y Redondo, 1999).

El análisis fractal hace una autocorrelación de la longitud de cada contorno de intensidad para distintos tamaños de la escala o patrón de medida. Si a medida que el patrón de longitud usado disminuye, se detectan nuevas convoluciones, la longitud total diverge. Estas convoluciones autosimilares pueden medirse de forma geométrica mediante una dimensión fractal (medida por el método del box-counting,

recubrimientos o celdas ocupadas para distintas particiones de distintos tamaños), que puede calcularse como.

$$D_2 = \frac{\ln N(\sigma)}{\ln \sigma}$$

Ec. 5-44

siendo $N(\sigma)$ número de recubrimientos y σ el número de particiones de tamaño L_0/σ . Se considera D_2 , ya que la posible curva fractal dada por un nivel determinado de la intensidad reflejada de la imagen SAR sólo puede alcanzar el valor $D=2$.

6 EXPERIMENTOS

Para realizar esta tesis ha sido necesaria la obtención de imágenes de vídeo como base de estudio para analizar distintos parámetros hidrodinámicos. Los experimentos se realizaron en diversas campañas de medición con diferentes escenarios hidrodinámicos y con distintos mecanismos de captación de imágenes.

Uno de los principales problemas a la hora de gestionar adecuadamente la zona costera es contar con herramientas y datos suficientes para que los gestores y técnicos puedan tomar decisiones. Pero lograrlas no siempre es fácil debido a sus altos costos y a su difícil aplicación e interpretación. Surge, por tanto, la necesidad de buscar métodos alternativos para conseguir esta información, como los sistemas de video.

Por medio de una imagen de un tramo de costa, se identifican puntos y zonas de interés: línea de costa, vegetación dunar, playa húmeda, parámetros del oleaje, zonas de rotura, etc. Además, si esta imagen se toma de forma continua, se genera una base de datos lo suficientemente larga como para cuantificar y evaluar de forma precisa los cambios que se producen en la costa.

6.1 INTRODUCCIÓN

Este trabajo está basado en experimentos de campo. Para la realización de técnicas experimentales es necesario el despliegue de unos medios materiales y la formación de un equipo interdisciplinar.

Los coeficientes de difusión obtenidos en los experimentos presentan una gran variedad, condicionada a la variación de los parámetros ambientales intrínsecos a la zona y muestran una dependencia característica con la escala temporal y espacial de los fenómenos predominantes. Así pues, la distribución de una sustancia depende de la interacción de múltiples escalas, por lo que el estudio en distintos escenarios permite un análisis mucho más amplio: zona de rompientes en la barra del Trabucador, mezcla de flujos en la cuña salina del Delta del Ebro, aguas confinadas en el puerto de Barcelona, mar abierto en el Mediterráneo Occidental.

Los experimentos observan la dispersión a pequeña escala, mediante trazadores puntuales o lagrangianos (boyas) y trazadores continuos (manchas), en la superficie del agua y a escalas mayores se observan manchas de crudo a través de imágenes de satélite.

Las medidas directas de los coeficientes de dispersión se correlacionan con suficiente detalle con medidas simultáneas de viento, oleaje, corriente interna, corriente de marea, temperatura del aire y del agua, morfología del fondo marino etc., con el objetivo de encontrar la dependencia funcional de la interacción de cada parámetro relevante del medio ambiente marino y la geometría de la zona con el coeficiente de difusión medido, pues se producen diferencias importantes.

Se toman datos de alta calidad, con una resolución tridimensional, a distintas escalas (macroturbulencia, olas de viento, olas largas y corrientes), con un instrumental específico para cada medida, de forma integrada para que los resultados estén sincronizados. Para ello es necesario diseñar un sistema combinando equipos y compatibilizando sus características específicas.

Con estos datos se calibran los modelos numéricos desarrollados, de propagación de oleaje irregular, de circulación Q-3D, de contaminación, etc. Así se obtiene un análisis completo y armónico de los procesos hidrodinámicos que permite cuantificar la influencia de cada parámetro en un proceso.

6.2 METODOLOGÍA DE LOS EXPERIMENTOS

La metodología incluye una parte de campo y otra de laboratorio. La primera corresponde principalmente a los medios logísticos de adquisición de imágenes y la segunda al instrumental de digitalización y proceso de imágenes.

Los principales aspectos a tener en cuenta son: tipo de experimento, objetivos, mecanismo de elevación, campo visual, puntos fiduciales, sincronización, trazadores, métodos de seguimiento y postproceso.

TIPO DE EXPERIMENTO:

Los experimentos pueden ser de campo o de laboratorio.

En el campo hay muchos inconvenientes o dificultades técnicas que dificultan la medición:

- Hay muchos parámetros variables (atmosféricos, estado del mar, etc.).
- Se pueden producir muchos fenómenos simultáneamente y puede no darse el que se desee medir.
- El mantenimiento y almacenamiento del material se hace de forma provisional.
- Es necesario prevenir cualquier contratiempo y disponer de repuestos y alternativas, pues la ley de Murphy se cumple frecuentemente.

Los experimentos hidrodinámicos, además de ser costosos, requieren un esfuerzo logístico importante tanto antes como durante y después de la medición. Por ello es importante:

- Verificar y calibrar los instrumentos en las condiciones lo más parecidas posibles al experimento.
- Hacer una planificación y organización exhaustiva del material, instrumentos y personal necesario para optimizar la eficacia del trabajo.
- No dejar nada a la improvisación: disponer de material de repuesto, adoptar hipótesis de actuación en situaciones extremas, estimar la duración de cada unidad y conocer los márgenes de maniobra, etc.
- Establecer una metodología para sincronizar los equipos.
- Adoptar una nomenclatura disciplinada y rigurosa de todos los datos y resultados, además de documentarlos con las observaciones oportunas.

En cambio, en laboratorio se trabaja con menor aleatoriedad.

OBJETIVOS DEL EXPERIMENTO.

Según la información que se desee obtener se desarrollará una metodología específica tanto para la medición como para el proceso de los datos. La técnica del análisis digital de imágenes puede ser aplicada a distintas ramas del campo de la ingeniería marítima, como por ejemplo a morfodinámica, topobatimetrías, campo de velocidades, campo de olas, evolución de contornos (superficie libre, línea de orilla, fondo, interfases, etc.), dispersión de trazadores, mezcla de masas de agua, trayectoria de objetos (buques, trazadores, partículas de sedimento, bloques, etc.).

MECANISMOS DE ELEVACIÓN.

Para registrar los experimentos hay que elevar la cámara a un lugar que permita obtener una visión del dominio de actuación. Cuanto más cenital y alta esté situada la cámara, mejor calidad de imagen se obtendrá. En laboratorio es fácil conseguirlo, pero en campo, hay que recurrir a medios auxiliares como farolas, grúas, mástiles de barco, globos, etc.

CAMPO VISUAL.

Para registrar un experimento conviene previamente determinar el campo visual de la imagen y ajustar la posición y orientación de la cámara, de modo que el dominio de los experimentos esté incluido en éste y que se vea con una resolución adecuada (por ejemplo que los puntos fiduciales se puedan distinguir, es decir, que ocupen al menos

un píxel). Además, hay que cuidar detalles como: tener una iluminación adecuada para que haya un buen contraste o eliminar sombras y reflejos.

PUNTOS FIDUCIALES PARA TRANSFORMACIÓN DE COORDENADAS.

Debido a las distorsiones de la lente gran angular y la inclinación de la cámara, es necesario hacer una transformación de coordenadas entre los píxeles de la pantalla y los puntos reales. Para ello se deben conocer las posiciones de un número mínimo de puntos fiduciales, marcados de forma que se puedan distinguir en la imagen, con los que se ajustan los coeficientes de la función de transformación.

SINCRONIZACIÓN TEMPORAL CON OTRAS VARIABLES HIDRODINÁMICAS.

Es deseable que si se toman medidas de otros parámetros adicionales se haga de forma sincronizada, pues aportan información adicional que permite estudiar la influencia de dichos parámetros en el proceso.

SELECCIÓN DEL TRAZADOR MÁS ADECUADO.

Para obtener parámetros hidrodinámicos mediante el análisis de imágenes es necesario que haya evidencias visuales suyas. Si no se visualizan de forma natural se puede conseguir artificialmente, vertiendo un trazador.

En el caso de dispersión de contaminantes es necesario seleccionar una sustancia que: sea persistente, de un buen contraste, no se altere con la presión, temperatura o salinidad, no sea nociva para la flora o la fauna y si es posible que no sea muy cara. Por ejemplo: Rodamina B, Fluoresceína sódica, Permanganato potásico, Cal o Leche.

En el caso de seguimiento por partículas, conviene que sean de un tamaño suficientemente grande para que ocupen al menos un píxel y de un color que de un buen contraste. Para atenuar el efecto del viento conviene darles cierto peso, de modo que no sean arrastradas con tanta facilidad.

MÉTODOS LAGRANGIANOS Y EULERIANOS

Para tomar las medidas hay dos tipologías, por un lado los aparatos con sensores dan medidas eulerianas, es decir fijas respecto al medio, y por otro lado los métodos lagrangianos, es decir en movimiento con el medio, que miden los parámetros relativos entre partículas. Así, las medidas de los sensores se consideran eulerianas, mientras que las de los trazadores son lagrangianas.

POSTPROCESO

El equipo de digitalización es controlado por un "software" a través de una interfase controladora. En este caso se empleó el desarrollado por el CERC, Cambridge, RU, denominado DigImage. Este programa permite obtener imágenes digitalizadas con una resolución espacial de 512x 512 píxeles y temporal de 25 Hz, con una variación en la intensidad de 0 a 255. Además dispone de numerosas aplicaciones, pero para algunos tratamientos específicos fue necesario desarrollar programas complementarios:

- TICE del LIM / UPC, Barcelona.
- Kd elaborado expresamente para este trabajo.
- Digiflow

6.3 CAMPAÑAS DE CAMPO

6.3.1 Campaña Delta 93

El Laboratorio de Ingeniería Marítima (L.I.M.-U.P.C.) estudió en profundidad la hidromorfodinámica de la zona costera del Delta del Ebro con distintas campañas de campo durante varios años y gran cantidad de datos para caracterizar la zona de rompientes e identificar y medir sus principales procesos: la estructura del flujo oscilatorio, el transporte de sedimentos y la dispersión de contaminantes.

En estos experimentos y en el postproceso de los datos obtenidos han colaborado distintas instituciones y los mismos han sido financiados por distintos proyectos:

- Proyecto de Hidrodinámica en Zona de Rompientes. Fase II, DGICYT del Ministerio de Educación y Ciencia. Está centrado en la Zona de Rompientes de un transecto de la Barra del Trabucador del Delta del Ebro.

- Proyecto FANS (Flow Across Narrow Shelves: The Ebro Delta Case) del programa MAST de la UE. Es mucho más ambicioso cubriendo un área de aproximadamente 75 x 50 Km² (desde el sur de Cabo Salou hasta las islas Columbretes). El estudio está separado en distintos subdominios:

- Zona de Rompientes (Surf Zone): de 0-3 m de profundidad.
- Zona costera (Nearshore): de 3-15/20 m.
- Zona de influencia del río.
- Zona de plataforma (Shelf), no tratada en esta presentación.

- Proyecto "La calidad de las aguas costeras. Investigación numérico-experimental de flujos hidro-bio-geoquímicos", Programa CYTMAR del CICYT (Ministerio de Educación y Ciencia).

De todos los parámetros posibles se seleccionaron los más importantes, de manera que se dispusiese de un conjunto completo de los principales procesos físicos:

- Oleaje incidente: dirección, períodos, alturas, espectros, grupos de olas.
- Niveles de superficie libre y su variación en distintas escalas temporales (viento, ondas largas y nivel medio).
- Campo vertical de velocidades en distintas escalas temporales.
- Campo horizontal de velocidades y sus variaciones en escalas temporales.
- Difusión turbulenta horizontal.
- Batimetría y sus cambios por efecto del transporte de sedimentos.
- Características morfodinámicas de la zona de estudio: presencia de barras, línea de rotura, formas rítmicas en la orilla y zona de "swash".
- Características granulométricas y de concentraciones en suspensión.
- Condiciones meteorológicas.

Con el análisis de imágenes se identifican directamente distintos aspectos como:

- Advección y dispersión de trazadores para estimar la difusión turbulenta longitudinal y transversal.
- Fracción de oleaje que rompe progresivamente a lo ancho de la zona de rompientes.
- Frecuencias dominantes del oleaje.
- Ondas de borde y batimetría rítmica.
- Barras sumergidas.
- Corrientes longitudinales y de retorno.

En campañas previas, dentro del marco de los proyectos de investigación financiados por la DGICYT, el MOPTMA y el programa MAST de la UE, se probó y desarrolló la metodología necesaria para el análisis de la dispersión de trazadores.

Para la elección del lugar de la campaña de medidas se tuvieron en cuenta numerosas posibilidades. Se seleccionaron cuatro playas: El Faro, La Marquesa, Los Eucaliptos y la Barra del Trabucador. Y finalmente se escogió esta última por los siguientes motivos:

- Cuasi-uniformidad longitudinal.
- Baja influencia de mareas.
- Accesibilidad y proximidad a Barcelona (LIM/UPC).
- Disponibilidad de información batimétrica, sedimentológica, de oleaje, etc.
- Importancia local y regional del lugar.

La Barra del Trabucador es parte de la flecha sur del Delta del Ebro, la cual suele ser sobrepasada por tempestades y presenta frecuentemente un perfil multibarrado y condiciones de uniformidad longitudinal. (Ver figura 6.1).

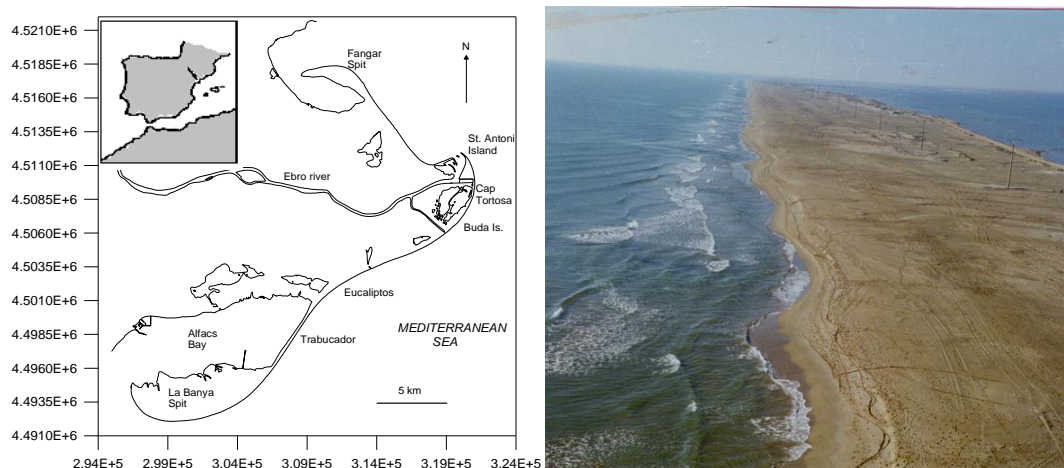


Figura 6-1. Situación y foto de la Barra del Trabucador en el Delta del Ebro

Selección del trazador óptimo para la dispersión. Se probó verter distintas sustancias o tintes. Se descartaron la Rodamina y el Permanganato de Potasio por su escaso contraste en el mar y por tanto difícil identificación en la grabación de vídeo. En cambio, se escogieron la Fluoresceína Sódica, por su alta persistencia, y la Leche, por su excelente contraste. La mezcla de leche con fluoresceína combinaba ambas ventajas. Para obtener una buena imagen y seguimiento de la mancha se ajustaron los volúmenes de colorante, se determinó que el instante de vertido debía coincidir con el seno de la ola, de esta forma se minimiza la perturbación de la espuma de la rotura. Estos trazadores se comportaron como buenos indicadores lagrangianos del flujo medio, no sólo superficial, ya que se movieron “solidariamente” a las boyas lastradas, la mayor parte de su recorrido.

Para el estudio de la advección se usaron boyas. En las pruebas sólo fueron visibles las de 30 cm de diámetro y de color amarillo. Las que dieron mejor comportamiento fueron las agrupadas en grupos de tres. Por otro lado, se observó que eran arrastradas por viento, por lo que para minimizar este efecto se decidió lastrarlas. Inicialmente se probó con probetas de hormigón, pero se descartó por las dificultades

logísticas que implicaba su uso (pesaban mucho y se necesitaba mucha gente para verterlas y recogerlas). Finalmente se dejó como lastre una cadena de acero de 20 cm. Esto supuso que cerca de la orilla rozaban el suelo y quedaban atrapadas. Las boyas terminaron finalmente en la línea de orilla, mientras que las manchas fueron advectadas paralelas a la costa hasta dispersarse totalmente.

Determinación de puntos fiduciales. Se confeccionaron banderas blancas de 0,5x0,5 m² con un asta de 1 m de altura, para posicionar puntos en la línea de orilla. También se consideraron las boyas de referencia ancladas en el mar y las posiciones del trineo.

Evaluación del medio de elevación y soporte de la cámara de vídeo. Las imágenes fueron tomadas desde el brazo extensible de una grúa en la playa. Se contrató una de triple tracción de 16 Tn y 20 m de longitud de brazo. La posición de la cámara se fijó de la forma más cenital posible y se graduó la orientación y altura para optimizar el campo de visión en las imágenes de vídeo en función de la lente utilizada (gran angular de 105°H y 88°V).

Sincronización y nomenclatura de los experimentos. Para cada experimento se anotaba el número de test, tiempo de cinta de vídeo y hora GMT. De esta manera se puede identificar cualquier imagen con el tiempo en que se tomó. El nombre de los tests de las distintas medidas tenían una raíz numérica común, cuyos dos primeros dígitos correspondían al día y los dos segundos al ordinal de test de trineo realizado durante ese día. En el caso del vídeo se añadía una letra para cada trazador vertido.

Del 11 al 17 de diciembre se midieron cinco estados de mar (12 tests) que cubrieron casos sin viento (el caso II 15 Diciembre), desde oleaje débil a oleaje de media energía coexistente con intensas corrientes (≈ 1 m/s) (caso IV 16 Diciembre) (ver Rodríguez et al., 1995).

6.3.2 Campaña Delta 96

En Noviembre de 1996 se reanudaron los experimentos (Delta'96). Se contó con la colaboración con otros institutos de investigación nacionales (Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX) e internacionales (Instituto Oceanográfico Gelendzhik y el Instituto Oceanográfico Shirshov de la Academia de Ciencias de Rusia) para la adquisición de medidas hidromorfodinámicas, (Sánchez-Arcilla 1997 a y b).

La zona de trabajo coincidió con la de la campaña Delta'93, la Barra del Trabucador del Delta del Ebro, en la zona de rompientes. Tuvo lugar del 30 de octubre al 10 de Noviembre de 1996. Las condiciones ambientales, medidas en 45 tests, fueron con presencia de vientos medios intensos (10-15 m/s) y oleaje débil a medio según el test ($H_s < 75$ cm).

La campaña se organizó por grupos de trabajo: topografía, trampas de sedimentos trineo y vídeo cada uno de los cuales se encargaba de un tipo de medidas. En la figura 6.2 se muestran los días de medida de cada grupo.

Tarea		Días:											
		30/10	31/10	1/11	2/11	3/11	4/11	5/11	6/11	7/11	8/11	9/11	10/11
Topografía	Inicial	■	■										
	Apoyo			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Final										■	■	■
Video	Globo (Video Color)				■	■							
	Grúa (Video B&N)			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Grúa (Video Color)											■	■
Trineo	Estación Meteorológica				■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Olas y Corrientes				■	■	■	■					
	Sedimentos				■	■	■	■	■	■	■	■	■
Trampas	PST												
Sedimento	Trampas Fijas				■							■	■
Playa	Estación Meteorológica	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Tetrapodo	EMC + SP												■

Figura 6-2. Cronograma de las medidas de la campaña Delta'96

El equipo de topografía midió la morfología de la playa y de la batimetría, tanto inicialmente como durante la campaña y al finalizar ésta, para ver la evolución de la morfología de la zona. Por ello fue el primero en actuar.

Previamente se había encargado la instalación de tres vértices mediante GPS con coordenadas UTM respecto al geovértice catalán y ortocota respecto el nivel medio del mar en Alicante. Estos vértices estaban instalados detrás de la duna que todavía queda en la Barra del Trabucador para mayor seguridad. Para establecer visuales con la playa fue necesario situar dos vértices auxiliares sobre la duna. Estos puntos fueron tomados con el método de medidas directas e inversas de Bessel para cometer menos errores. A partir de ellos se establecieron 10 bases alineadas paralelamente a la línea de orilla. Las cinco centrales estaban separadas unos 20 m y las laterales 50 m. Desde cada base, por radiación, se trazó un perfil transversal a la playa hasta la zona sumergida que podía ser cubierta a pie. Debido a la hidrodinámica de la zona, había dos barras de arena, ligeramente oblicuas a la línea de orilla, cuya batimetría podía hacerse a pie. El resto, la zona entre las barras, se hizo desde una embarcación neumática tipo Zódiac, posicionando desde tierra y midiendo la profundidad con un escandallo.

Posteriormente, el equipo de topografía también se encargó de posicionar los distintos ensayos y los puntos fiduciales necesarios en la transformación de coordenadas de las imágenes de vídeo.

El equipo de sedimentos se encargó de cuantificar el transporte de sedimentos poniendo trampas, fijas y móviles. Éstas consistían en unas bolsas alargadas de una tela sintética porosa (equivalente a 200 micras) que permiten el paso del agua pero no

del sedimento (fracción arena). Las bolsas se colocaban en una estructura metálica a distintas profundidades y se las mantenía en el agua un determinado tiempo en función del transporte longitudinal en suspensión. Después se sacaban y se guardaba el contenido para su posterior análisis en laboratorio.

EQUIPO HIDRODINÁMICO DE LA ZONA DE COSTA

En la zona de costa se dispuso un **tetrápodo** (figura 6.3) fondeado a 3,5 m de profundidad y aproximadamente a 150 m de la línea de orilla. Se midieron olas, nivel del agua (η) y velocidades horizontales mediante un conjunto de sensor de presión (SP) y un correntímetro electromagnético biaxial para corrientes en el plano horizontal (Interocean S4) situado a 1,5 m del fondo.



Figura 6-3 Tetrápodo-Instrumental con S4DW correntímetros y sensor de presión.

El oleaje se midió a una frecuencia de 4 Hz en registros continuos de 35 minutos cada hora. Las mareas y corrientes se obtuvieron promediando registros de 2 minutos cada media hora. Los datos de presión y velocidades fueron guardados en la memoria interna del aparato como archivos de vectores promediados en 2 minutos que permiten la obtención de niveles y corrientes medidas.

Se dispuso también de medidas de oleaje direccional en alta mar en registro continuo con una boya direccional Datawell Waverider y medidas de oleaje, corrientes y sedimentos en suspensión con 2 trípodes fijos con 3 correntímetros electromagnéticos esféricos 2D Delf P-S (CEM), 3 "Optical Back-Scatter" (OBS), 1 sensor de presión cada uno, además de baterías y un "Data logger" (Campbell-CR10) fondeados a una profundidad aproximada de 10 a 20 m. El período de medición fue de 1 mes aproximadamente

EQUIPO HIDRODINÁMICO DE LA ZONA DE ROMPIENTES

Dentro de la Zona de Rompientes se dispuso un en un **trineo**(figura 6.4), una estructura metálica de acero inoxidable marino, no magnético, de unos 2,5 m de alto, 2,5 m de largo y 1,8 m de ancho, que servía de soporte para los aparatos de medida. 6 correntímetros electromagnéticos, 1 sensor de oleaje, 3 Backscatters ópticos, 1 Brújula y 1 prisma óptico y se podía desplazar mediante trácteles desde la costa.



Figura 6-4. Trineo Instrumental.

Se midieron olas, niveles, y velocidades con sensores situados con una distribución helicoidal en la vertical: 6 correntímetros electromagnéticos Delft e.m.s.-P 2D con una frecuencia de muestreo de 20 Hz dispuestos a 10, 20, 30, 40, 60 y 80 cm del fondo. También se tomaron medidas de sedimentos en suspensión mediante turbidímetros ópticos OBS (Optical Back-Scatter) (Shirshov) a una frecuencia de 20 Hz durante 30 minutos, dispuestos a 0,05, 0,25 y 1 m del fondo para medir las componentes horizontales. Esta disposición permitió conocer la estructura 3D y la capa límite del fondo, en 45 posiciones calibrados con 1 brújula digital Aanderaa con un error menor a 0,3 grados. Los niveles de agua se midieron mediante un sensor de contacto WG (Etrometa) apto para la Zona de Rompientes a frecuencia de 4 Hz.

Equipos	Distancia costa	Prof (m)	Sensores	Frec.Muestreo.
NS-Tripodes 1-2	1500-3000 m	8,5 – 12,5	3CEM,3OBS,1 SP	2 Hz, 20'/3Hr
SZ-Trineo	150 m	3.5	1 CEM, 1 s.pres.	2-4Hz, 20'-40'
Boyas DWR 1 2	1500-aprox10Km	8 – 50	3D acelerómetros	1.78 Hz, 20'/3Hs
Tramp. Sed.	De 50 a 200 m	de 1 a 3	recip.de captura	1-2 días
Vídeo IMG	de 0 a aprox.300	de 0 a 3-4	BN-color	50 Hz, 30'

Tabla 6.1. Situación del Instrumental empleado

Todos los datos se almacenaban en 1 datalogger CR10 de 14 canales en un contenedor estanco para recibir conjuntamente los datos de los correntímetros y la señal del sensor de altura de ola para asegurar la sincronización de las medidas. La frecuencia de muestreo de los correntímetros fue de 20 Hz y la del sensor de altura de ola de 4 Hz, permitiendo estudiar el flujo oscilatorio y la macroturbulencia producida por la rotura del oleaje. La duración de las series temporales osciló entre 20 y 40 minutos. En la tabla 6.1 se indican los aparatos desplegados durante la campaña y alguna de sus características.

El equipo de vídeo se encargaba del registro de imágenes de trazadores que se echaban en la zona de rompientes simultáneamente a los test de trineo. El equipo de vídeo constaba de una cámara en blanco y negro fijada en el extremo de la pluma de una grúa de 40 m y de otra en color suspendida de un globo de PVC hinchado con Helio sobre la zona de vertido. Como el globo se inutilizó al tercer día de campaña, se subió la otra cámara a la grúa pues se había previsto que podía haber problemas con el globo y se preparó el soporte de las cámaras para que pudiesen ir dos cajas estancas (véase la figura 6.5).



Figura 6-5. Extremo de la grúa con las dos cámaras.

Las imágenes se transmitían por cable hasta dos magnetoscopios S-VHS donde eran grabadas simultáneamente. Para visualizarlas se disponía de una única pantalla con un desviador de la señal que permitía elegir imágenes. Adicionalmente, se filmó mediante una cámara portátil desde la cesta de la grúa de 40 m.

Inicialmente se hicieron pruebas para que el posicionamiento de las cámaras permitiera un buen campo de visión. Finalmente se adoptó una posición oblicua que dejaba la zona de rompientes en la diagonal. Después se prepararon manchas con distintos trazadores (leche, agua con fluoresceína, leche con fluoresceína) para ver cual proporcionaba un óptimo contraste. El más usado fue la combinación de 6 litros de leche y dos cucharadas de fluoresceína sódica, pero también se vertieron manchas de leche sola y de fluoresceína (figura 6.6). A continuación se resumen los test realizados.



Figura 6-6. Mancha de leche cerca del trineo.

Día / Test	Trazador	Hora Gmt	Tiempo B/N	Cinta	Tiempo Cinta Color
01 00 A	boyas	16:50		b0	
01 00 B	6 leche		0:06:30	b0	
01 00 C	6 leche		0:17:57	b0	
02 01 A	boyas	13:12	0:57:33	b0	
02 01 B	boyas	14:50	1:13:31	b0	
02 02 A	6 leche	15:10	0:06:30	b1	
02 02 B	6 leche	15:21	0:17:57	b1	
02 03 A	6 leche	16:14	0:57:23	b1	
02 03 B	6 leche	16:14	0:57:33	b1	
03 01 A	6 leche	9:30	1:04:30	b1	
03 01 B	6 agua+ 2fl	9:31	1:06:30	b1	
03 01 C	6L2F	9:34	1:07:40	b1	
03 02 A	boyas	12:12	1:14:50	b1 c1	0:47:10
03 02 B	boyas	12:24	1:29:00	b1 c1	1:01:00
03 02 C	6L2F	12:34	1:34:22	b1 c1	1:06:45
03 03 A	6 leche	14:56	2:25:40	b1 c1	1:58:03
03 03 B	6 leche	15:14	2:43:40	b1 c1	2:16:43
03 03 C	6 leche	15:35	3:04:12	b1 c1	2:36:25
04 03 A	6 leche	11:14	0:11:53	b2 c2	
04 03 B	6 agua+2fl	11:15	0:12:48	b2 c2	
04 03 C	6L2F	11:18	0:15:55	b2 c2	
04 04 A	6L2F	11:55	0:51:40	b2 c2	
04 05 A	6L2F+boyas	12:17	1:14:28	b2 c2	
04 06 A	6L2F+boyas	12:53	1:51:00	b2 c2	
04 07 A	6L2F+boyas	16:06	0:01:03	b3 c3	
04 07 B	6L2F+boyas	16:06	0:01:08	b3 c3	
05 00 A	6L2F+boyas	9:43	0:21:40	b3 c3	
05 01 A	6L2F+boyas	10:58	1:19:00	b3 c3	
05 02 A	(6L2F)*2	11:58	1:45:46	b3 c3	
05 03 A	6L2F	12:36	2:11:10	b3 c3	
05 04 A	6L2F	13:14	2:36:40	b3 c3	
05 05 A	6L2F	16:42	0:16:35	b4 c4	
06 01 A	6L2F+boyas	9:57	0:44:00	b4 c4	
06 01 B	(8L3F)*2	11:06	1:05:00	b4 c4	
06 01 C	boyas	11:13	1:12:00	b4 c4	
06 02 A	6L2F	13:36	1:44:30	b4 c4	
06 02 B	2boyas	13:49	1:45:12	b4 c4	
06 03 A	6L2F+2boyas	14:58	2:06:00	b4 c4	
06 04 A	6L2F	15:35	0:03:00	b5 c5	

Día / Test	Trazador	Hora Gmt	Tiempo B/N	Cinta	Tiempo Cinta Color
07 02 A	(6L2F)*2	9:52	0:15:00	b5 c5	
07 08 A	(6L2F+9b)*2	16:11	0:32:00	b5 c5	
08 07 A	6L2F	14:31	2:09:00	b5 c5	
08 07 B	6L2F	14:39	2:17:05	b5 c5	
08 07 C	6L2F+2boyas	15:56	2:33:35	b5 c5	

Tabla 6.2 Experimentos de Delta 96

6.3.3 Desembocadura del Ebro

Esta campaña se planteó como un trabajo multidisciplinar para estudiar el estuario de la desembocadura del río Ebro. Se trata de una zona de especial interés pues se tiene lugar un choque entre dos flujos de agua con características muy distintas. Por un lado se produce una intrusión en profundidad de agua marina que remonta río arriba en forma de cuña, y por otro lado el agua dulce del río se descarga al mar extendiéndose superficialmente como una capa fina flotante en forma de pluma (figura 6.9) (Rodríguez et al 1997 c).



Figura 6-7. Interfase de la pluma de agua dulce en el mar.

Se tomaron medidas tanto hidrodinámicas como bioquímicas para caracterizar el estuario y el medio estuarino y costero-fluvial. El área de estudio era muy amplia y presentaba muchas dificultades para su medición, de forma que se fue necesario un gran despliegue de medios, distintos tipos de embarcaciones e instrumentos de medida, y de personal de distintas instituciones. El trabajo se repartió por temas de la siguiente forma:

- L.I.M – U.P.C. (Laboratorio de Ingeniería Marítima de la Universidad Politécnica de Cataluña). Se encargó de la preparación y organización de la campaña, además de la medición de los parámetros físicos. En particular realizaron:

- El fondeo de un tetrápodo que servía de estructura de sustento de un C.T.D (Conductivity, Temperature & Depth) y un correntímetro electromagnético

direccional (S4DW) con sensor de presión. La adquisición de datos se hizo de forma continua en un punto de la interfase, a unos 10 m de calado, delante de la desembocadura.

- Toma de los datos necesarios para el modelado numérico de la intrusión de la cuña salina y su evolución con la marea. Para ello primero se midió la batimetría de una sección de control del río y después se trazó una poligonal de unos 2 km con puntos a lo largo de la orilla desde los que se medía la altura de la lámina de agua en las distintas etapas de la marea. Previamente se había hecho una predicción de la marea cogiendo los cinco armónicos principales y ajustando la amplitud con los registros de una boya en L'Ametlla y la fase con las medidas que se hicieron en la barra del Trabucador en Noviembre. También se llevó a cabo la toma de muestras de sedimentos con una draga para ver la evolución de la granulometría en el frente de la cuña salina.
- Por otro lado, se tiraron manchas de trazadores y se grabaron en vídeo desde lo alto del mástil del velero "Barcelona" para realizar un análisis digital de la dispersión de éstas.

- U.P.V. (Universidad Politécnica de Valencia). Se encargaron del análisis de nutrientes del agua, tanto en la superficie como a distintas profundidades, con especial interés en la interficie salobre. Para detectar la cuña salina emplearon un CTD. Tomaron muestras de agua, mediante una bomba de succión, que se guardaron en botellas especialmente acondicionadas para cada tipo de análisis, y se conservaban en neveras hasta su llegada al laboratorio. Allí se determinaron: los nitritos, nitratos, fósforo, silicatos, sólidos en suspensión, clorofilas, células totales, potencial Redox y en algunos casos la salinidad. También se tomaron medidas de velocidad mediante un molinete.

- U.B. (Departament d'Ecologia de la Universitat de Barcelona), con el barco "Caribdis", una lancha motora equipada para hacer perfiles continuos de C.T.D. y botellas "Niskin", de un metro de altura, para tomar muestras de agua a distintas profundidades y medir la productividad primaria y el consumo de oxígeno.

- Facultad de Náutica de la U.P.C. que contribuyó a la campaña con "el Barcelona" un velero de 12 m de eslora, "la Pachanga" una barcaza, una lancha neumática y la tripulación necesaria para su navegación.

- El "Tethys" (buque oceanográfico francés), que era el encargado de medir en la zona costera, pero por problemas burocráticos no se les concedió el permiso necesario.

- Centre d'Estudis Avançats de Blanes, se dedicaron a estudiar la poblaciones de fitoplancton y otros parámetros biológicos.

6.3.4 Puerto de Barcelona

Como complemento al proyecto de ampliación de las obras del puerto de Barcelona redactado por Alatec-Haskoning se iniciaron una serie de experimentos para medir la dispersión en las diferentes zonas del puerto de Barcelona. Después la Autoridad Portuaria mostró su interés en continuar con los mismos para analizar su variabilidad estacional así como su entorno. Los experimentos, resultados y análisis de los mismos, están ampliamente detallados en el informe realizado para la Autoridad Portuaria. "Difusión Turbulenta y Transporte de Contaminantes en la Zona del Puerto de Barcelona: Estudio integrado de visualización mediante satélites, observación

remota local y medidas in situ” (2000-2001). Aquí se presenta un resumen de los mismos.

SITUACIÓN

Se tomaron imágenes de los experimentos desde 23 emplazamientos. Se empezó por la bocana y se recorrieron los principales muelles. En la figura 6.10 se indica la situación de los experimentos.



Figura 6-8 Mapa de las medidas en el puerto de Barcelona

1. Bocana Aguas afuera
2. Bocana Prolongación del dique
3. Bocana Aguas adentro
4. Bocana Contradique
5. Nuevo contradique
6. Muelle Alvarez de la Campa
7. Muelle de Lepanto
8. Inflamables
9. Dársena Sur
10. Dársena Interior
11. Estibadora de Ponent
12. Pantalan de Petroleros
13. Canal de acceso
14. TCB
15. Ergransa
16. Dársena de Morrot
17. Puente – Muelle de Poniente
18. Puente – Muelle Occidental
19. WTC – Dársena de Sant Bertran
20. WTC – Muelle Cataluña
21. WTC – Maremagnum
22. Portal de la Pau – Maremagnum
23. Muelle del Reloj – Aquarium

La bocana del puerto es una zona especial por su intenso tráfico marítimo y condiciones de agitación. Su estudio se realizó de forma sectorial en abanico desde aguas afuera hasta el interior, de más agitadas a más abrigadas.

La ubicación de las cámaras está en una zona despejada, por lo que se puede orientarla en todas las direcciones, de forma que permite abarcar desde el mismo emplazamiento todos los sectores de estudio.

La cámara portátil se colocó en el final del Dique del Este, unas veces en el espaldón y otras en la baliza verde que señala la entrada por la bocana (figura 6.11). En la parte más elevada de la baliza está ubicada la cámara de control remoto número 41. Esta cámara puede girar sobre sí misma casi completamente, tan solo no puede abarcar un pequeño sector hacia el Dique.



Figura 6-9. Situación de las cámaras de vídeo en el Dique del Este.

Las imágenes de esta cámara se visualizan en el centro de control de la policía del puerto y se registraron cuando fue posible. En la figura 6.12 se puede ver un ejemplo, el sector más interior, con el zoom lo más abierto posible, es decir máximo ángulo visual o máximo dominio, unos 33°.

Desde lo alto del espigón se puede visualizar (en condiciones atmosféricas buenas) un radio de hasta 1 km alrededor de su morro. La calidad de las imágenes y, por tanto, la resolución espacial del estudio disminuye con la distancia, por lo que no se puede ir más allá (resolución \cong dominio / 512 píxels).



Figura 6-10. Foto de la bocana del puerto de Barcelona

TRAZADORES

Para caracterizar los procesos de mezcla se vertieron manchas de leche teñida de verde amarillo con fluoresceína sódica. Se eligió este fluido porque no es contaminante, de hecho es nutritivo y se coloreó para mejorar el contraste.

Para determinar el campo de velocidades se necesitan trazadores puntuales o lagrangianos. Se hicieron pruebas con boyas lastradas de distintos tamaños y formas para ver cuál de ellas se veía menos afectada por el viento.

En cuanto a formas se lanzaron boyas huecas, flotadores salvavidas y unos globos semillenos de agua. Se probaron distintas boyas: verdes de 20 cm, rojas de 30 cm y blancas de 40 cm como se puede ver en la figura 6.13.



Figura 6-11. Foto de una serie de boyas

Se lastraron con unos deflectores metálicos con sección en L de 10x10x22,5 cm y 1 cm de espeso, (ver figura 6.14). Esta forma apuntada, como la proa de los barcos, favorece su arrastre. El lastre estaba suspendido a 1 m del centro de las boyas. Las boyas verdes y rojas tenían una L y las blancas dos. Para las verdes el lastre resultaba muy pesado y quedaban sumergidas unas $\frac{3}{4}$ partes siendo difícil distinguirlas. Por otro lado, las blancas eran muy poco manejables, por su tamaño, para tirarlas y recogerlas muchas veces.

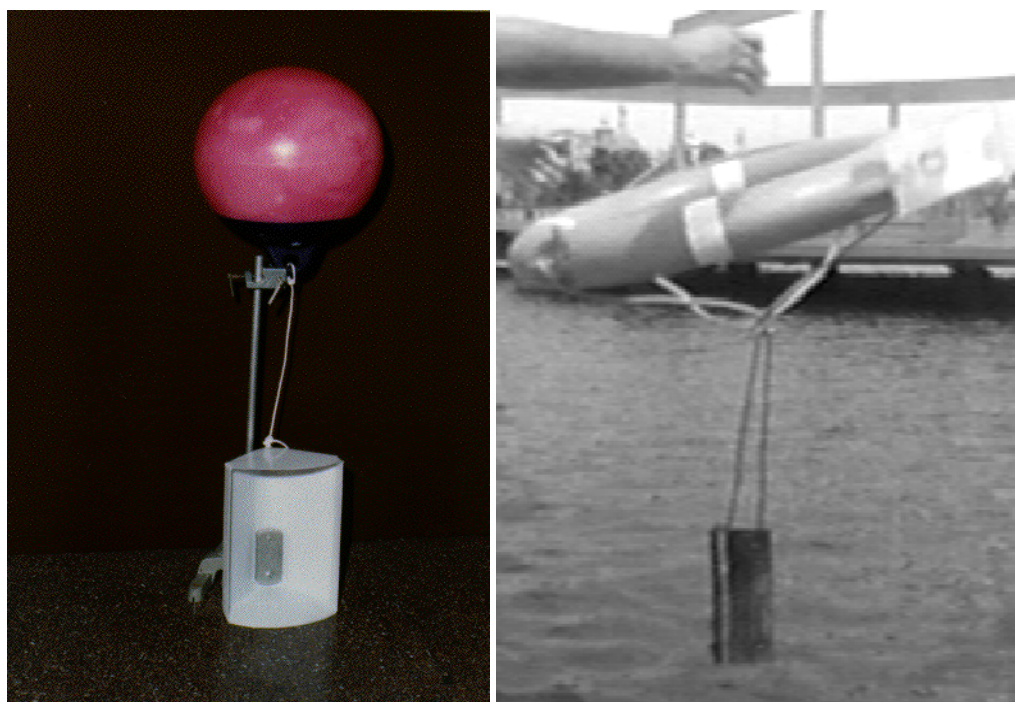


Figura 6-12. (Izq) Boyas lastradas y (der) salvavidas lastrados por el centro con deflectores metálicos con sección en L de 10x10x22,5 cm y 1 cm de espesor.

Los flotadores salvavidas eran como los exigidos en la normativa de seguridad naval, rígidos de 80 cm de diámetro y 10 cm de espesor (ver figura 6.15). Los salvavidas lastrados tienen la ventaja de que son más visibles pues son más grandes y se recogen fácilmente por la cuerda. Su poco espesor ofrece muy poca superficie resistente al viento. Sin embargo también se lastraron con deflectores metálicos de sección en L de 10x10x22,5 cm y 1 cm de espesor para obtener una velocidad promediada de una capa superficial de 50 cm en lugar de 5 cm, que es lo que se sumergiría si no se lastra.

Los globos eran especiales, de alta resistencia, inflables hasta 1 m de diámetro. Para los experimentos se llenaban con agua corriente y se inflaban con aire en la misma proporción, quedando de unos 40 cm de diámetro. No se hincharon más para evitar que se rompieran por el impacto con el agua o el transporte. La principal ventaja es que no es necesaria su recogida, agilizando los experimentos.

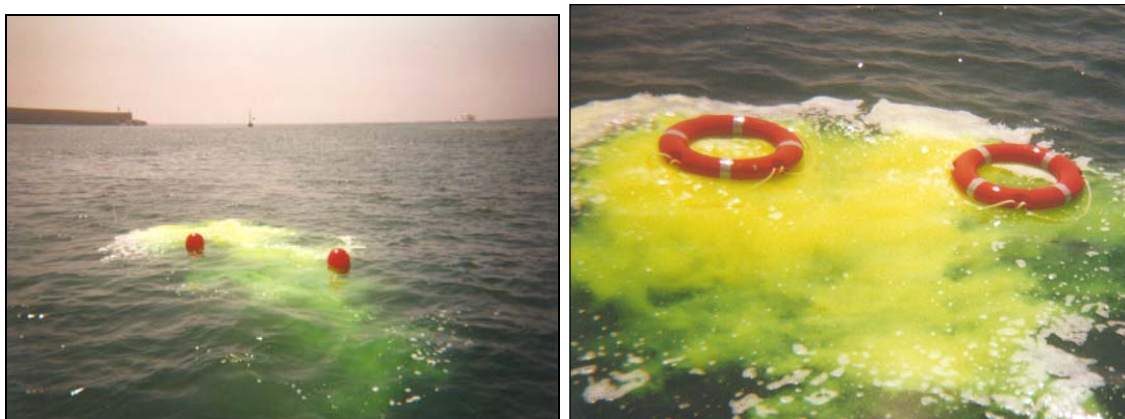


Figura 6-13. Fotos de los trazadores en el puerto.

POSICIONAMIENTO

Debido a la inclinación de la visual es necesario realizar una transformación de coordenadas, para lo cual deben identificarse en la imagen puntos de posición conocida. Cada vez que se movía la cámara o el enfoque se debían tomar nuevos puntos para establecer una transformación de coordenadas. El posicionamiento se realizó vía satélite con un G.P.S. diferencial de precisión centimétrica.

El sistema estaba instalado en una embarcación de 13 m de eslora, el Pedro Alvarado, tripulada por personal autorizado. También estaba equipada con sonar para realizar trabajos topográficos. Esta misma embarcación es la que se empleó para verter los trazadores (figura 6.16).

Es necesario disponer de un mecanismo de comunicación entre el centro de control de las imágenes, la embarcación y la cámara portátil para verificar el dominio visual de la zona, asociar los puntos de la pantalla con posiciones, informar sobre observaciones, paso de embarcaciones, etc. Para ello se dispuso de un sistema de Walky Talkies con un radio de acción suficiente para cubrir todo el dominio portuario.



Figura 6-14. Foto del equipo de posicionamiento y vertido

En la figura 6.17 se muestra el esquema de la planificación de las campañas respecto a los resultados, para cada día se representa simultáneamente el mapa de velocidades de corriente y de viento junto con el diámetro de las manchas un minuto después de su vertido.

Hora	Xutm	Yutm	Z(m)	V10	Vmax	Dir10	DirM	Hs(cm)	Tp(s)	DirM	cm	cm/s	DirNE	D(m)	Kl(m ² /s)	Vcm/s
11:08	30907	76489	19,5	51	68	190	183	47	4,38	144	32	19	9			
11:15	30849	76505	19,1	55	73	188	184	47	4,39	143	31	47	28	9,4	0,9	10,1
11:19	30899	76492	20,0	55	73	188	185	47	4,40	143	30	20	63			
11:32	30829	76405	18,9	50	65	189	185	47	4,41	142	30	53	28			
11:37	30799	76304	18,8	45	56	190	168	47	4,42	141	30	27	28	15,1	4,1	27,1
11:57	30783	76422	17,7	39	56	205	207	47	4,45	136	29	31	18			
12:04	30729	76444	17,8	52	66	192	186	47	4,46	136	29	26	-31			
12:06	30737	76435	18,0	52	66	192	186	47	4,46	136	29	17	-84			
12:09	30697	76387	17,5	52	66	192	186	47	4,46	136	29	9	-31			
12:22	30606	76486	15,8	50	60	192	197	47	4,46	135	30	23	0	18,3	1,3	9,2
12:25	30701	76495	17,0	43	61	189	181	47	4,46	135	31	29	0			
12:26	30738	76495	12,0	43	61	189	181	47	4,46	135	30	37	-3			
12:30	30451	76506	15,4	43	61	189	181	47	4,46	134	29	27	0	5,2	0,2	8,8

Tabla 6.2. Resultados del día 5-7-99

6.4 IMÁGENES POR SATÉLITE SAR

Las imágenes del Radar de Apertura Sintética son un proceso de detección activa donde se emite radiación electromagnética de una longitud de onda de pocos centímetros y se procesa una correlación cruzada durante cierto tiempo del barrido. Su representación gráfica se puede interpretar como un mapa de la rugosidad superficial.

Se han utilizado principalmente imágenes de los satélites ERS-1 y ERS-2 (figura 6.18), de la Agencia Espacial Europea en el ámbito del proyecto Europeo Clean (Jolly et al. 2000). El proyecto ENVIRONMENT - CLEAN SEAS - ENV4-CT96-0334 está dentro del programa de cooperación internacional de la Comunidad Europea que integra los procesos de Monitoriamiento Integrado de Areas Costeras (Integrated Coastal Area Management-ICAM). El Mediterráneo fue clasificado como zona costera de acción prioritaria en 1996 en el 5th Programa de Accion Ambiental (5th Environmental Action Programme) que resalto la importancia del entendimiento de la dinámica física, biológica y humana de la zona costera para un mejor gestión de la misma.

En cada órbita del satélite se obtienen 20 imágenes de un dominio de unos 100x100 km (véase el mapa de dominios en la figura 6.19) para la zona de Cataluña-Golfo de León, con una resolución de unos 50 m/pixel y un periodo de unos 35 días. También se tiene acceso a las imágenes del satélite RADARSAT, de la Agencia Canadiense del espacio, capaz de una cobertura bastante más elevada, hasta 300x300 km, y mayor resolución 12 m/pixel. La combinación de varios sensores SAR permite prever que se pueda contar con imágenes de una misma zona cada 5-10 días

SAR sensor	Mode	Resolution (m)	Pixel spacing (m)	Swath width (km)	Incidence angle (°)
ERS-2	PRI	30×26.3	12.5×12.5	100	20–26
ENVISAT	Image Mode (Precision Image)	30×30	12.5×12.5	100	15–45 (7 swaths)
RADARSAT-1	SCN	50×50	25×25	300	20–46
RADARSAT-1	SCW	100×100	50×50	450–500	20–49
ENVISAT	WSM	150×150	75×75	400	16–44

Tabla 6.3 RADARSAT International (2000), European Space Agency (2002) y ERS-2 Web-site (2004).

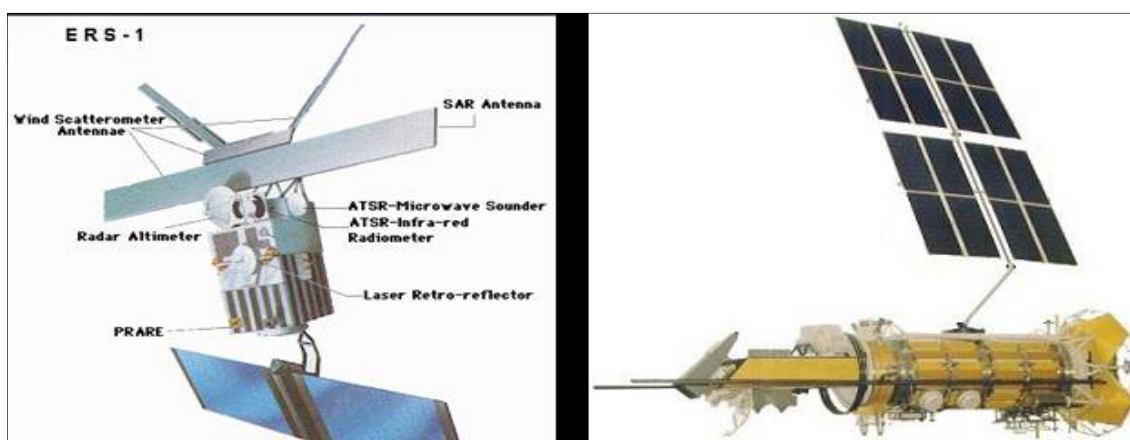


Figura 6-16. Satélites ERS1 y ERS2

En el marco del convenio con la Autoridad Portuaria de Barcelona se analizaron las imágenes de la franja de Cataluña y el Golfo de León, cuyos resultados se publicaron en Díez et al. (1999), Platonov (2002) y posteriormente se publicaron más resultados en Platonov et al. (2008), Matulka (2009) y Tarquis et al (2011). Las imágenes SAR detectan los vertidos con mejor definición que los satélites del espectro visible, ya que no están afectados por las nubes, como se puede ver en la comparativa de la figura 6.20, ni por el grado de luminosidad. Disponen de una buena cobertura y funcionan con un rango de viento de suave a 12-14m/s, aunque la detección depende del tipo de hidrocarburo y de su vejez.

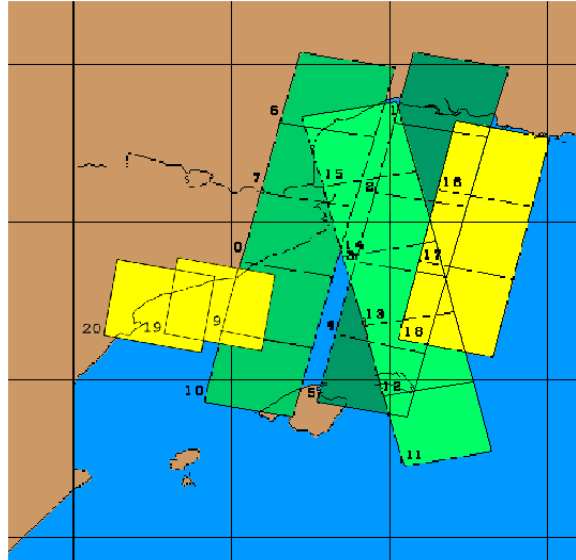


Figura 6-17. Mapa de la zona analizada en Cataluña y el Golfo de León. Díez et al 1999.

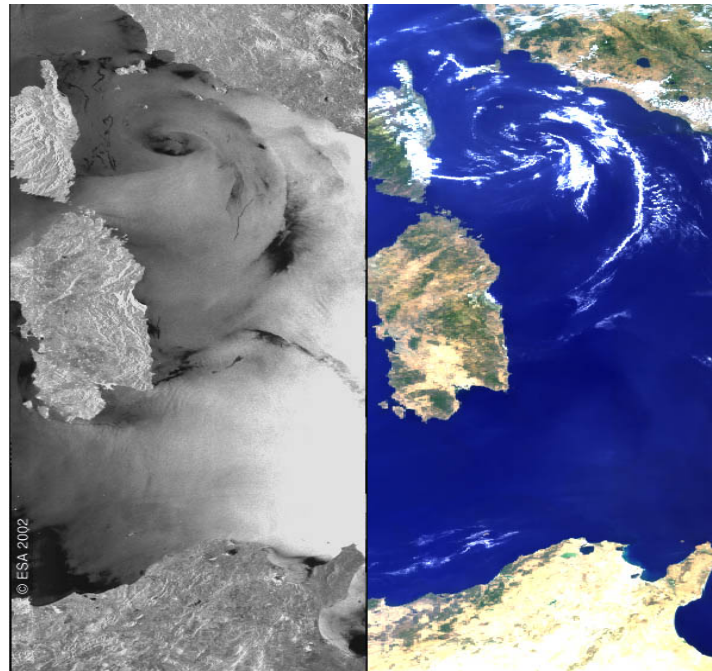


Figura 6-18 Comparación de imagen satélite de SAR y de MERIS (visible) de ENVISAT (ESA).

7 RESULTADOS

Una vez obtenidas las imágenes, se analizan y correlacionan con el resto de medidas para caracterizar los procesos hidrodinámicos: dispersión, espectro de oleaje, corriente, marea, remolinos, cizalla, etc. A continuación se describen algunos de los resultados obtenidos.

Del análisis de la evolución del tamaño de las manchas se obtuvieron los coeficientes de difusión en los diferentes escenarios.

Del análisis de series temporales de una línea se obtuvieron espectros de energía.

Del promediado de imágenes se analizó la batimetría, presencia de barras y rotura de las mismas. También es posible cuantificar la evolución de la línea de orilla y de ondas de borde.

Para aislar el efecto de la corriente se analizó la velocidad de las boyas lagrangianas. En el caso de la zona de rompientes de la barra del Trabucador se identificó una corriente de retorno "Rip current".

En el puerto de Barcelona se correlacionó la velocidad de las boyas y del viento.

El análisis fractal de las imágenes de satélite permite distinguir el origen de las manchas y la vorticidad de la zona y estimar la difusión a diversas escalas.

Estos resultados se compararon con otras medidas y resultados de simulaciones numéricas.

7.1 COEFICIENTES DE DISPERSIÓN

El método de análisis descrito anteriormente permite, de forma sencilla y eficaz, obtener información cuantitativa sobre los coeficientes de dispersión a partir de imágenes de vídeo y estudiar las variaciones locales y temporales de los efectos de la turbulencia en zona de rompientes.

Se analizan los coeficientes obtenidos en las campañas de campo (tabla 7.1)

Campaña	Ebro'93	Ebro'96	Vilanova	Recife	Barcelona
N ^{er} Experimentos	12	45	8-10	40	33
Viento (m/s)	0-10	0-15	0-10	0-25	0 – 10
Oleaje (m)	0.1-0.75	0.1-0.5	0.1-2	0.5-3	0-0.50
Corriente (m/s)	0-1.5	0-0.65	0-0.1	0-3	0-0.30

Tabla 7.1. Condiciones de las distintas campañas de campo.

7.1.1 Resultados de Delta 93

Para los experimentos de la Barra del Trabucador, realizados a distintas distancias de la orilla, con condiciones de oleaje y viento similares, el rango de valores del coeficiente de dispersión transversal fue de 0,005 a 0,035 m²/s.

Estos valores son ligeramente superiores a los obtenidos en experimentos previos, de 0,001 a 0,025 m²/s, para el caso de Vilanova, con una playa confinada entre espigones sin posibilidad de generación de corrientes longitudinales fuertes.

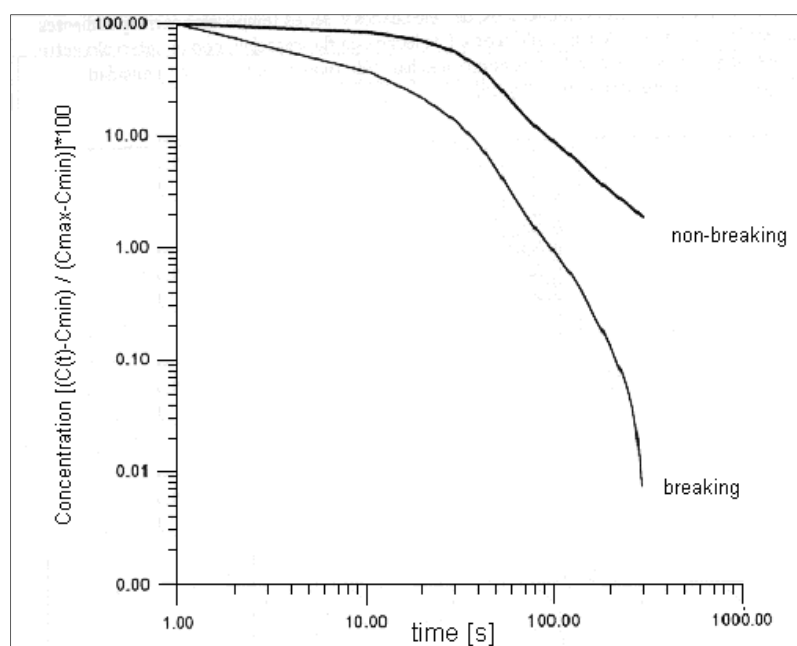


Figura 7-1. Comparación del proceso de mezcla con y sin rotura del oleaje. Bahía 1997

La comparación de la evolución de las manchas en zonas de oleaje con o sin rotura muestra que los valores de los coeficientes de mezcla y de la anisotropía son mucho

mayores en el caso con rotura que en el caso sin rotura. La figura 7.1 muestra la comparación del decaimiento relativo entre estos dos casos. Se puede ver que la rotura favorece claramente el proceso de mezcla debido a la turbulencia generada por ésta y que esta diferencia crece con el tiempo.

El comportamiento de la dispersión es fuertemente anisotrópico. El rango del coeficiente transversal en rotura es de 0,035 a 0,376 m^2/s con una fuerte variación temporal, mientras que el longitudinal permanece constante como 0,124 m^2/s (figura 7.2). Si se cuantifica la anisotropía como el coeficiente de la varianza longitudinal entre la transversal V_x/V_y se observa que éste también es mayor para oleaje en rotura. Se ha observado que el coeficiente de difusión aumenta donde es mayor la corriente longitudinal, debido a que la mayor turbulencia está asociada a velocidades mayores.

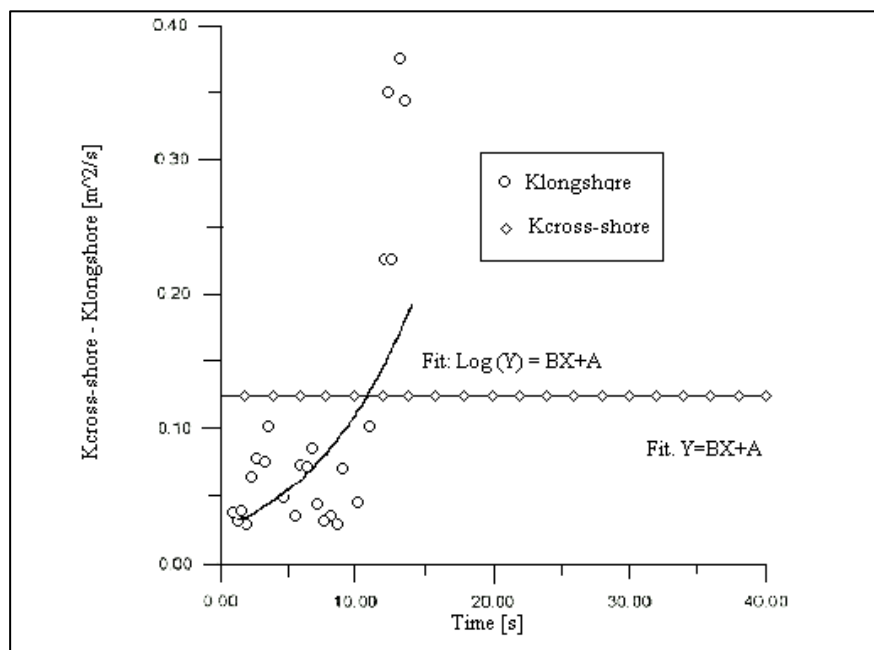


Figura 7-2. Evolución de los coeficientes de difusión. Bahía 1997

La distribución transversal de los coeficientes de dispersión es casi parabólica según Thornton (1970), Thornton et al. (1983), Sasaki et al. (1976) y Rodríguez (1997), siendo el máximo donde la corriente longitudinal es máxima (figura 7.3). Los resultados experimentales son coincidentes con las predicciones del modelo propuesto por Rodríguez et al. (1995) y confirman la mezcla vertical intensa en la zona de surf. A partir de estos resultados, se considera que la Ley de Richardson de 4/3 no es aplicable a la difusión de zona de surf porque los picos de espectro de energía (generados debido a la ruptura de la onda) son demasiado cercanos y el subrango inercial es muy bajo. Otros estudios sugieren que el coeficiente de dispersión de zona de surf depende fuertemente del tamaño de la mancha de trazador, según los valores de Horikawa et al. (1978) y Horikawa (1988).

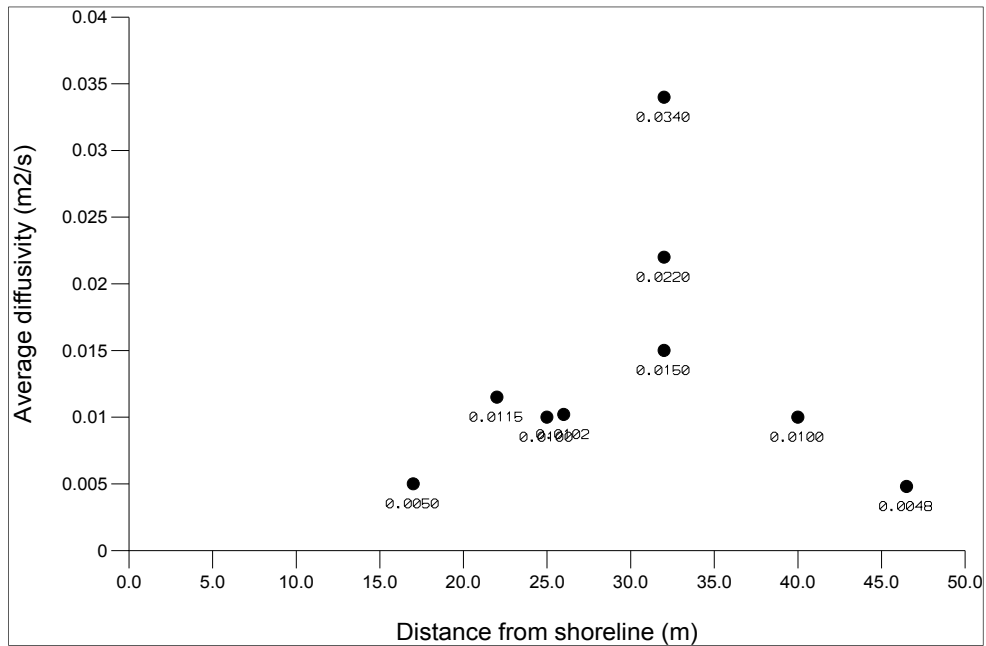


Figura 7-3. Variación del coeficiente de difusión según la distancia a la orilla. Bahía 1997

7.1.2 Resultados de Delta 96

Los experimentos se correlacionaban con otras variables meteorológicas como viento y presión (figuras 7.4 y 7.5).

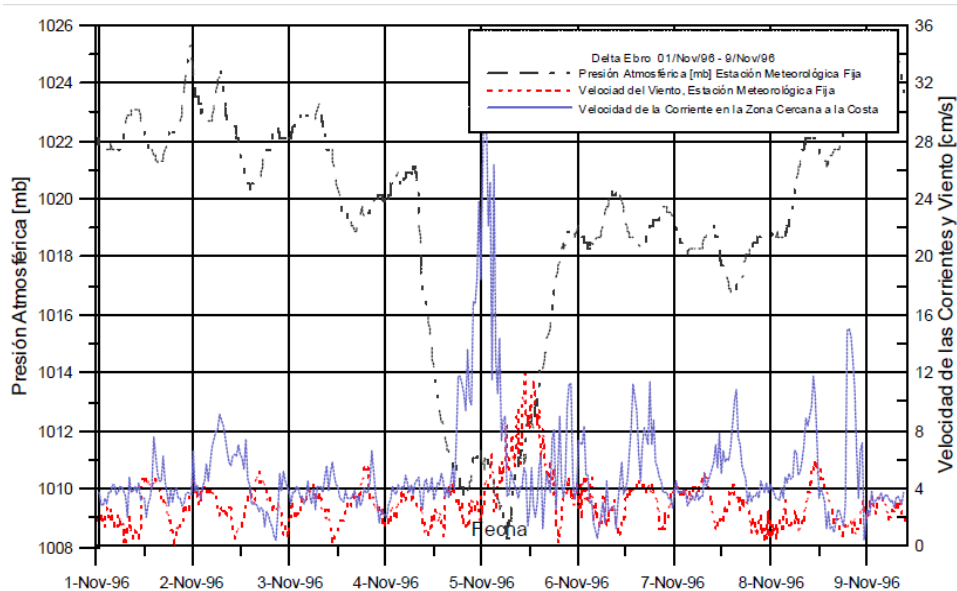


Figura 7-4. Influencia de variables meteorológicas

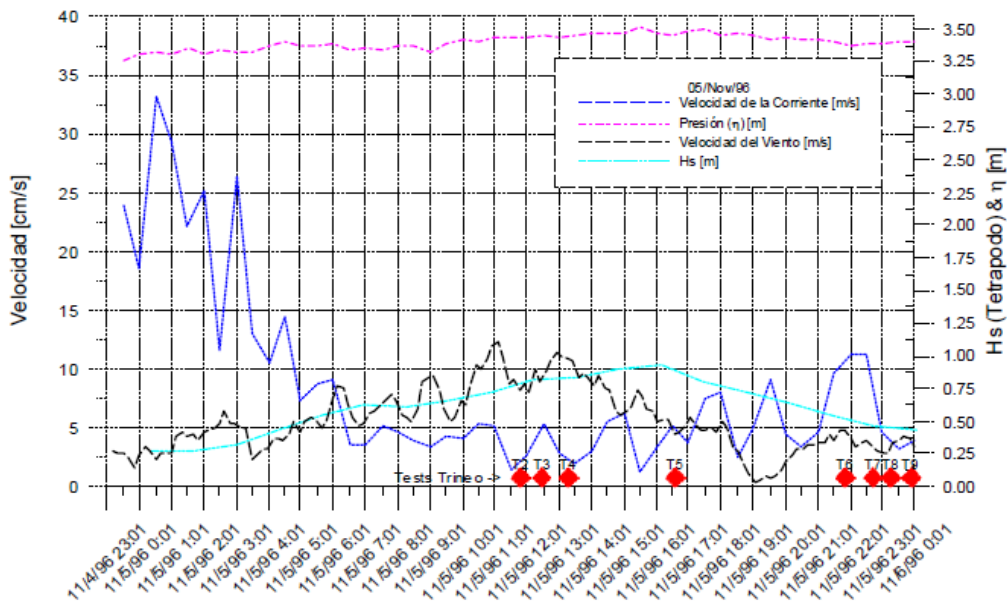


Figura 7-5. Datos del día 5.11.96

Del análisis de las manchas se obtuvo la evolución de la dispersión. En la fase inicial, el coeficiente de dispersión es casi constante, ya que inicialmente la mancha, vertida en la superficie, se mezcla verticalmente y sólo después de ocupar casi toda la columna de agua se expande horizontalmente. Debe aclararse que se trata de manchas pequeñas y medianas (con un diámetro medio de unos 3 m) con respecto a las dimensiones dominantes: en la escala vertical la profundidad y la altura de ola que son del orden del metro, mientras que en la escala horizontal la longitud de onda es aproximadamente de 20 m y el ancho de la zona de rompientes de unos 50 m. Los efectos de la corriente longitudinal, en la advección y distorsión de las manchas, fueron una característica dominante durante los experimentos del Delta del Ebro. Las mediciones lagrangianas, por vídeo, y eulerianas, con correntímetros electromagnéticos, de corrientes longitudinales fueron similares en todos los casos, con una intensa mezcla vertical en la zona de rompientes (figura 7.6).

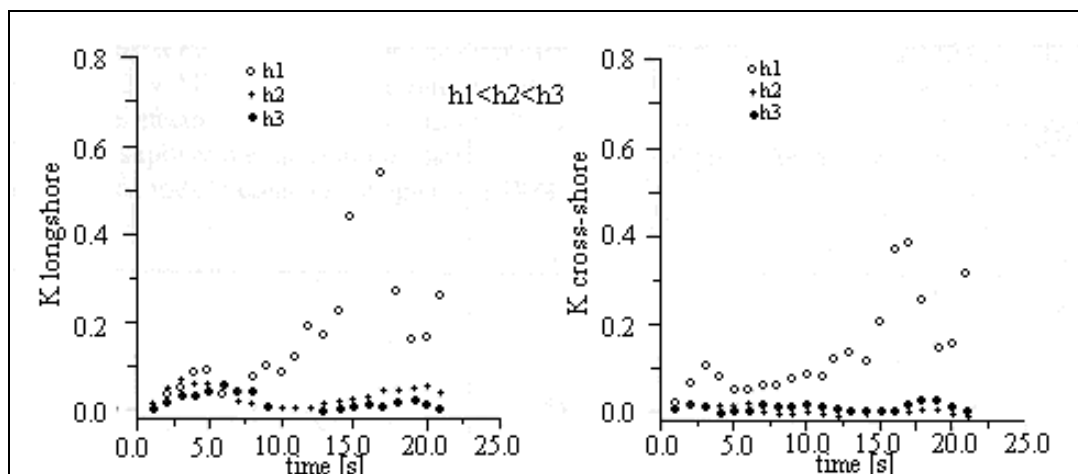


Figura 7-6. Evolución del coeficiente de difusión con el tiempo.

7.1.3 Resultados de Recife (Brasil)

La evolución de los trazadores en los experimentos de Brasil se realizó analizando el decaimiento de su centro y la evolución de su tamaño. Los resultados, en parte, se analizaron junto Maria Ozilea Bezerra mientras se desarrollaban los experimentos en el puerto de Barcelona. Los resultados de todos los experimentos (Recife, Vilanova, Delta y Barcelona) se analizaron conjuntamente y se presentaron en: Bezerra et al. (1998), Díez et al. (1999b, 2000, 2005, 2006, 2008), Redondo et al. (2009).

En la mayoría de los experimentos, las isolíneas de concentración del trazador en la difusión de la mancha tienen una forma más semejante a una elipse. Aceptando esta premisa, las elipses son posicionadas en relación a un sistema de coordenadas x e y determinado, pudiendo coincidir o no coincidir con alguno de los ejes (ver por ejemplo la figura 7.7).

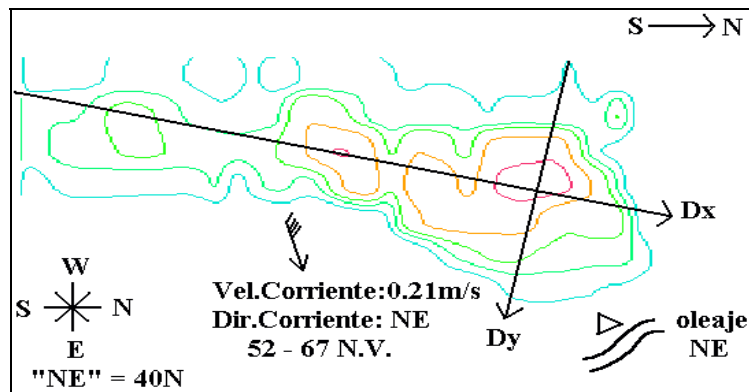


Figura 7-7. Distribución de concentración Olinda 1 13.10.95, exp. 2, marea de reflujo.

Las dimensiones de la mancha cambian en el tiempo en las direcciones del eje de la elipse (Figura 7.8).

La intensidad máxima, usualmente se encuentra cerca del centro de la mancha y generalmente decrece con el tiempo (figura 7.9), aunque eso puede cambiar según el tipo de trazador y de la hidrodinámica. La mancha puede también alargarse en varias direcciones o sencillamente flotar. La intensidad de estos fenómenos depende de los parámetros que gobiernan el proceso, como influencia del gradiente de velocidad de la corriente, del oleaje, de la cizalla producida por el viento en la capa superficial, del tiempo etc.

Olinda 2

Día: 14/10/96 - Marea: Sizigia - Exp.:4 - H:17:20

Difusion de Trazador Continuo

$$KX0 = V * DX0 = 0.200035 * 4.32637 = 0.865425423 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$$

$$KX45 = V * DX45 = 0.200035 * 13.327945 = 2.666055478 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$$

$$KY0 = V * DY0 = 0.093887 * 3.43706 = 0.322695252 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$$

$$KY45 = V * DY45 = 0.093887 * 7.661975 = 0.719359846 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$$

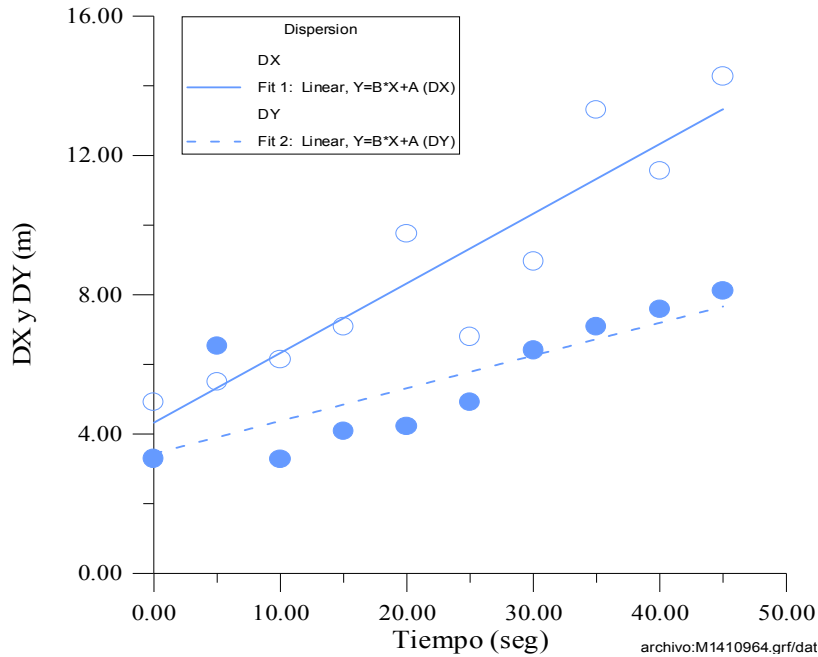


Figura 7-8. Evolución de la dimensión de trazador continuo en el tiempo.

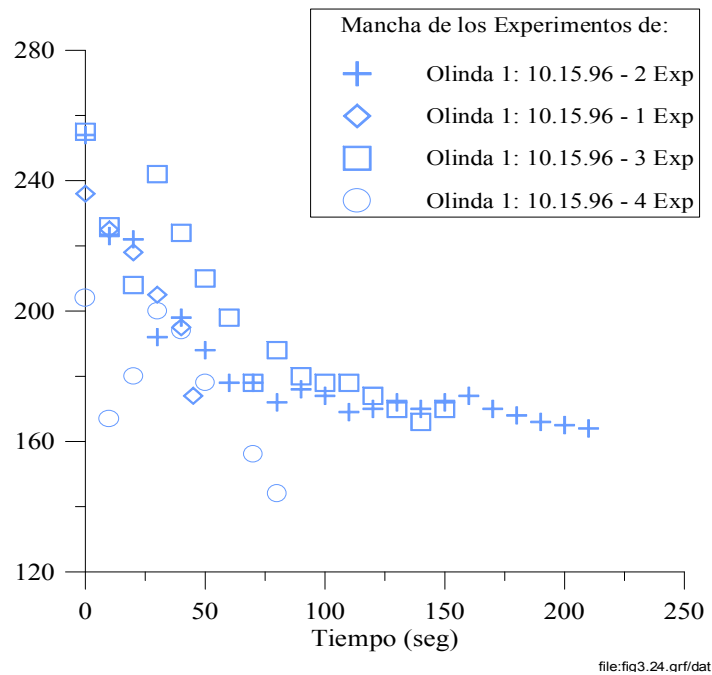


Figura 7-9. Decaimiento de la intensidad del centro del trazador continuo. (Bezerra 2000)

7.1.4 Resultados de Vilanova i la Geltrú

Los resultados de los experimentos de Vilanova i la Geltrú están publicados en la tesis de Maria O Bezerra (2000). En general se trata de condiciones de baja energía, sin marea, por lo que la difusividad es baja.

Según Ozmidov (1990), las curvas de concentración siguen la distribución normal gaussiana simétrica en relación al tiempo total, según la relación $\sigma^2=2Dt$, siendo D el coeficiente de difusión molecular en el mar y t el tiempo, lo que supone que la concentración decrece exponencialmente con el tiempo. En el caso de Vilanova se puede confirmar esta distribución (Figura 7.10).

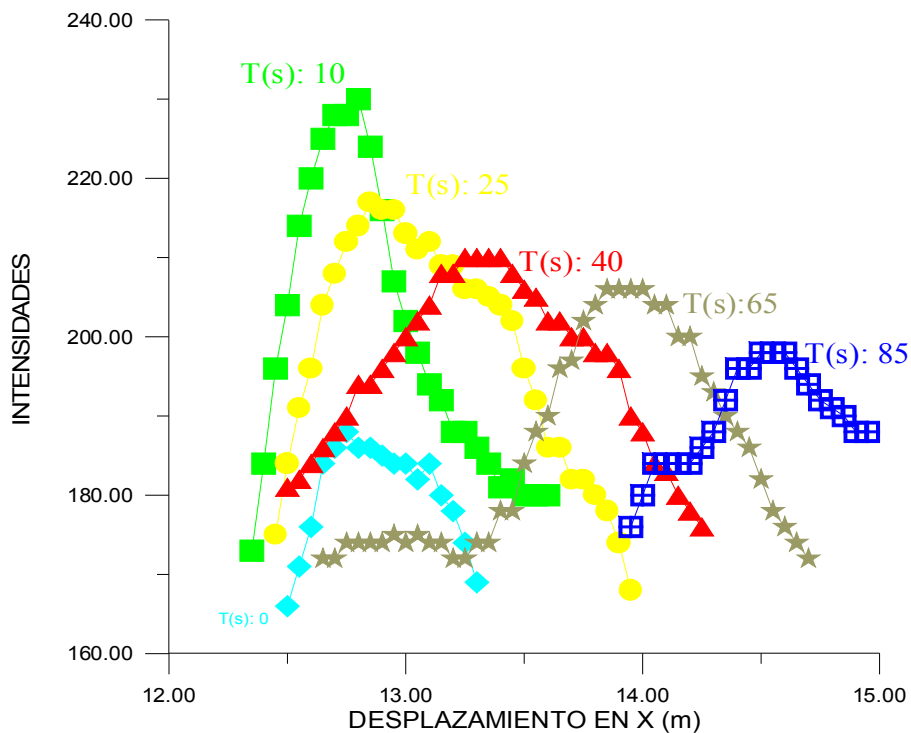


Figura 7-10. Distribución de concentración de 6 manchas.

En estos experimentos también se analizó la fricción por viento u^* a partir de perfiles logarítmicos de viento.

7.1.5 Resultados del puerto de Barcelona

5 DE JULIO DE 1999.

Durante las medidas, el viento registrado en la estación meteorológica a 10 m de altura venía de dirección Sur (180-190°) y con rachas entre 4,3 y 7,3 m/s. El oleaje llegaba de levante (140°) con una altura significativa de 47 cm y un periodo de pico de 4,4 s. La marea estaba subiendo suavemente a un ritmo de 1 cm por hora.

Las boyas en la parte interior del puerto son arrastradas a 20-30 cm/s por el viento y reforzadas por la marea creciente que acumula agua en el interior del puerto. En la parte exterior las boyas alcanzan los 50 cm/s cerca del dique aunque lejos no llegan a los 20 cm/s y se desvían 30° respecto la dirección del viento por el efecto de la corriente pero también siguen una dirección NE. Este hecho se ve reforzado por el dato cualitativo de la pluma del Llobregat, que acaba metiéndose en el puerto al mediodía. Los flujos medios se presentan en la Figura 7.11.

Se vertieron cuatro manchas de seis litros de leche teñida con fluoresceína:

- Una exterior, que en un minuto alcanzó un diámetro de 9,5 m y se desplazaba a 10 cm/s, dando un coeficiente de dispersión de 0,9 m²/s.
- Una mancha en la prolongación del dique, que en un minuto alcanzó un diámetro de 15,1 m y se desplazaba a 27 cm/s a la misma velocidad que las boyas, lo que indica que la columna estaba muy bien mezclada, pues la velocidad superficial y la de la columna de mezcla son iguales. La superposición de agentes forzadores, viento, corriente y marea, produce el máximo coeficiente de dispersión de 4,1 m²/s.
- Una frente al morro, que en un minuto alcanzó un diámetro de 18,2 m y se desplazaba a 9 cm/s dando un coeficiente de dispersión de 1,3 m²/s debido a la disipación energética que produce inicialmente la difracción.
- Una mancha en la parte interior, que en un minuto alcanzó un diámetro de 5,2 m y se desplazaba a 9 cm/s dando un coeficiente de dispersión de 0,2 m²/s.

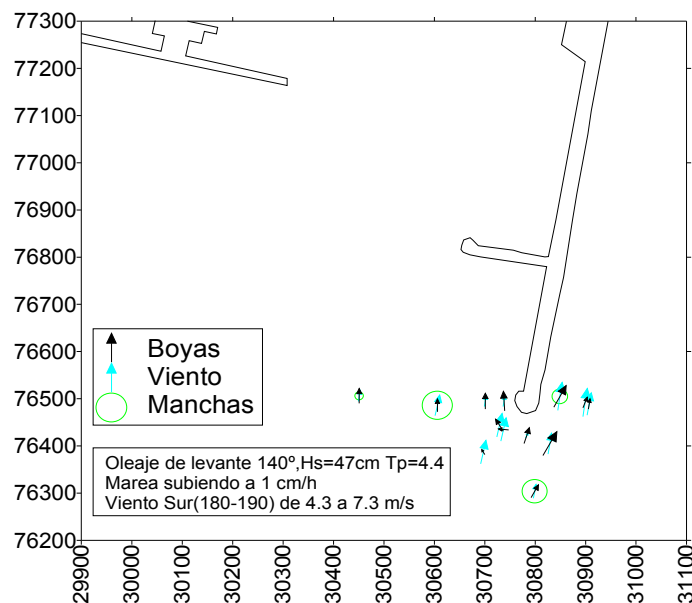


Figura 7-11. Flujos promedio medidos del 5 de Julio.

13 DE JULIO DE 1999.

Durante las medidas, el viento medido en la estación meteorológica a 10 m de altura venía de dirección Sur ($180-200^\circ$) y con rachas entre 3,5 y 8,3 m/s. El oleaje llegaba de levante (118°) con una altura significativa de 50 cm y un periodo de pico de 5,2 s. La marea estaba bajando suavemente a un ritmo de 3 cm por hora.

Las boyas en la parte interior del puerto eran arrastradas a 20-30 cm/s cuando había calma hacia el interior del puerto y a 40-50 cm/s en las rachas de viento. En la parte exterior, las boyas siguen el oleaje de levante en lugar del viento, sur, a unos 20 cm/s. En la prolongación se producen velocidades de 40-50 cm/s debido a la difracción. Los flujos medidos durante ese día se representan en la figura 7.10.

Se vertieron seis manchas de seis litros de leche teñida con fluoresceína:

- 1 mancha en la prolongación del dique que, en un minuto alcanzó un gran diámetro de 12,5 m debido a su advección a 17 cm/s, pues su coeficiente de dispersión era pequeño $0,7 \text{ m}^2/\text{s}$.
- 1 frente al morro, una que en un minuto alcanzó un diámetro de 13,9 m aunque se desplazaba despacio, a 8 cm/s, debido a la dispersión producida por la difracción de $2,5 \text{ m}^2/\text{s}$.
- 2 en la zona de sombra producida entre el morro y el martillo del Cajonero, una en el interior de $D=12 \text{ m}$ $v=4 \text{ cm/s}$ y $k=0,8 \text{ m}^2/\text{s}$ y otra cerca del morro de $D=12 \text{ m}$ a $v=4,6 \text{ cm/s}$ y $k=1,7 \text{ m}^2/\text{s}$, el doble que la anterior, pues puede que estuviese afectada por la difracción
- 2 manchas en la parte interior, que en un minuto alcanzaron un diámetro de 6,5 m y se desplazaban a 5 y 9 cm/s dando unos coeficientes de dispersión de $0,2 \text{ m}^2/\text{s}$.

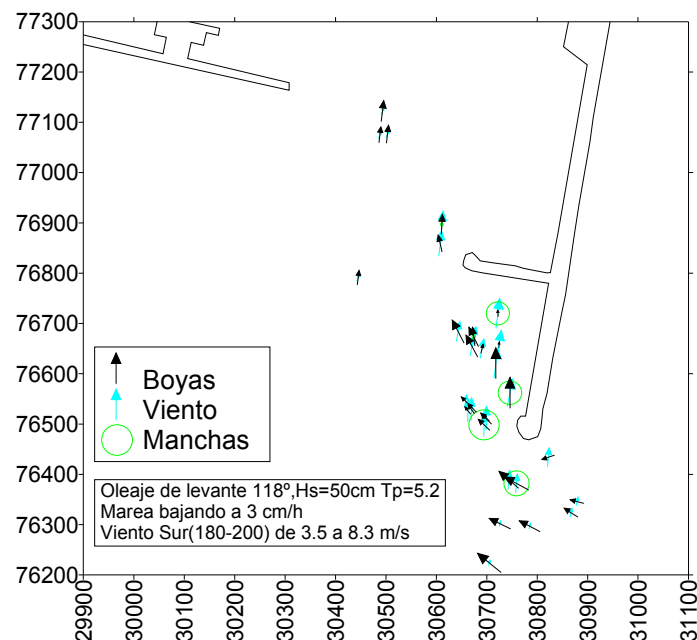


Figura 7-12. Flujos promedio medidos del 13 de Julio

20 DE JULIO DE 1999.

El viento medido en la estación meteorológica a 10 m de altura provenía de Xaloc (145°) y era muy suave, prácticamente inexistente ("calma chicha") entre 2,5 y 5 m/s. El oleaje llegaba de levante (110°), con una altura significativa de 47 cm y un periodo de pico de 4,6 s. La marea estaba en pleamar.

Las boyas en la parte interior del puerto eran suavemente arrastradas por el viento hacia el interior del puerto a 10-15 cm/s cuando había calma, llegando a 27 cm/s cuando soplabla el viento. En la parte exterior las boyas eran arrastradas hacia el NNW a 10 cm/s por el viento y el oleaje de levante. En la prolongación la difracción hace meterse lentamente las boyas al puerto. En la figura 7.11 se han esquematizado los flujos de ese día.

Se vertieron ocho manchas de seis litros de leche teñida con fluoresceína:

- 2 en la parte exterior, una que se hizo de 10 m y apenas se movía a 5 cm/s dando un $k=1,2 \text{ m}^2/\text{s}$ y otra que creció mucho más debido a su advección a 23 cm/s, dando un $k=2,9 \text{ m}^2/\text{s}$ relativamente alto, posiblemente debido a que sea una zona de cizalladura.
- 2 manchas en la prolongación del dique, que en un minuto alcanzaron $D=7\text{m}$ y 10 m. La primera, más cercana, se metía en el puerto a 10 cm/s, mientras que la más alejada apenas se movía; sus coeficientes de dispersión eran pequeños, de 0,3 y 1 m^2/s respectivamente.
- 1 frente al morro, que en 1 minuto alcanzó un diámetro de 11 m y que estaba casi quieta, a 8 cm/s, y se dispersaba lentamente a 1,3 m^2/s .
- 1 en la zona de sombra producida entre el morro y el martillo del Cajonero, de $D=6 \text{ m}$ $v=5 \text{ cm/s}$ y $k=0,16 \text{ m}^2/\text{s}$.
- 2 manchas en la parte interior, que en un minuto alcanzaron un diámetro de 9 m y se desplazaban a 5 cm/s, dando unos coeficientes de dispersión de 0.9 m^2/s .

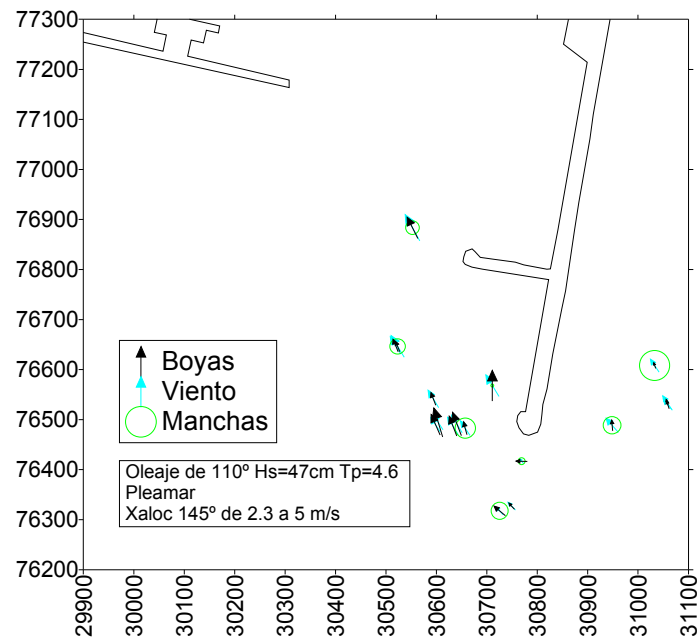


Figura 7-13. Flujos promedio medidos del 20 de Julio

25 DE FEBRERO DEL 2000.

El viento medido en la estación meteorológica a 10 m de altura era un Garbí (210°) de intensidad entre 6 y 11 m/s. El oleaje llegaba de levante (110°) con una altura significativa de 58 cm y un periodo de pico de 4,92 s. La marea estaba bajando a 1,7 cm/h.

Las boyas en la parte interior del puerto son suavemente arrastradas por el viento hacia el interior del puerto a unos 30-40 cm/s en el centro del canal y a unos 20 cm/s aguas afuera. En la parte del morro, el flujo se ve obligado a dividirse para bordearlo, la línea de flujo exterior alcanza velocidades de 30-38 cm/s mientras que la línea interior apenas alcanza los 20 cm/s, tal y como se representa en la figura 7.12.

A pesar de que el viento era mayor que en los días de verano, no se aprecia un incremento significativo de las velocidades debido a que la dirección del viento era contraria a la corriente litoral y a la marea, que era vaciante. En ausencia de estratificación, el momentum de la capa superficial se transmite a toda la columna de agua.

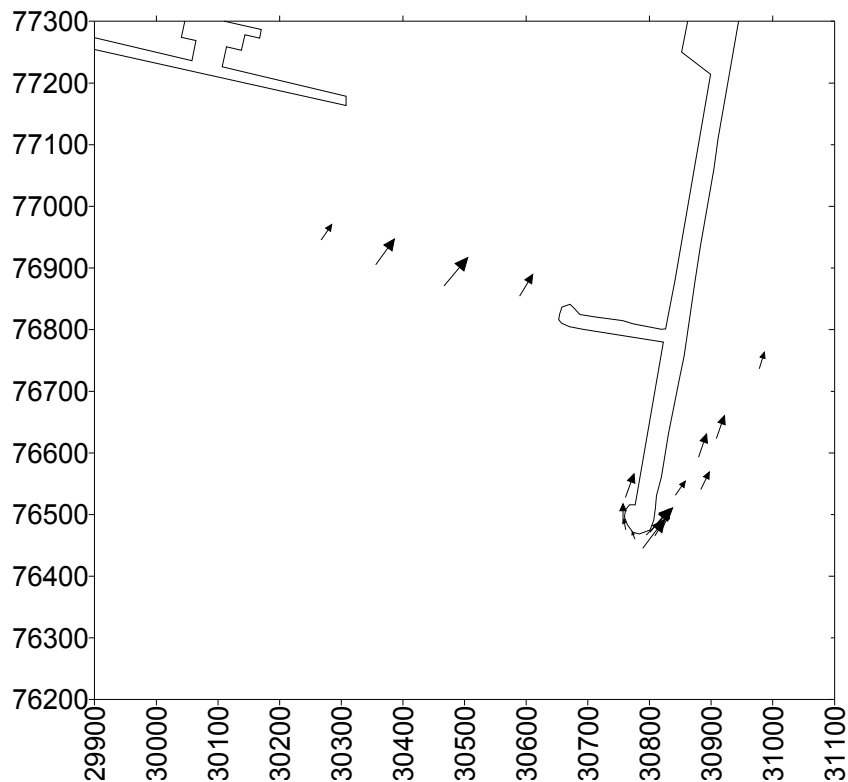


Figura 7-14. Flujos promedio medidos del 25 de Febrero del 2000 de 12 a 16h.

17 DE MARZO DEL 2000

El viento registrado refleja un cambio brusco (figura 7.15) hacia las 12:30 del mediodía tanto de intensidad que subió de 2-3 m/s a 6-7 m/s como de dirección, que roló de Ponent (275°) a Migjorn (185°. La marea estaba bajando a 1 cm/h).

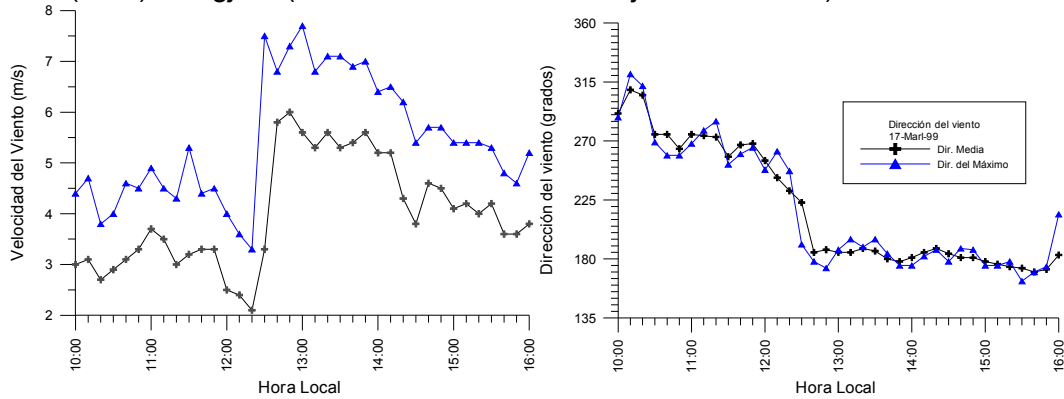


Figura 7-15. Velocidad y dirección del viento el 17-3-2000.

Las boyas de la parte interior, lanzadas a las 10.30, se dirigen desde el muelle de inflamables al dique del Este tangentes al nuevo contradique y al martillo, describiendo un gran remolino de giro horario a unos 10 cm/s. Sin embargo, las lanzadas a las 12:50 son arrastradas por el viento hacia el interior del puerto a unos 10 cm/s.

En la parte exterior, las boyas siguen la corriente litoral NS en contra del suave viento a 10 cm/s. En la prolongación del dique del Este se hicieron dos transectos paralelos al dique. Las boyas del lado más exterior se desplazan longitudinalmente, siguiendo la corriente litoral hacia el Sur a unos 10 cm/s.

Las boyas del transecto interior parecen describir una corriente ortogonal a la primera (Figura 7.16) pero este desplazamiento es debido al gran oleaje generado por un Fast Ferry que pasó poco después de lanzar la última boya y que afectó a las tres últimas boyas. De hecho, la última (más cercana al morro) se dejó hasta después del siguiente tramo, que posiblemente también esté afectado por el oleaje.

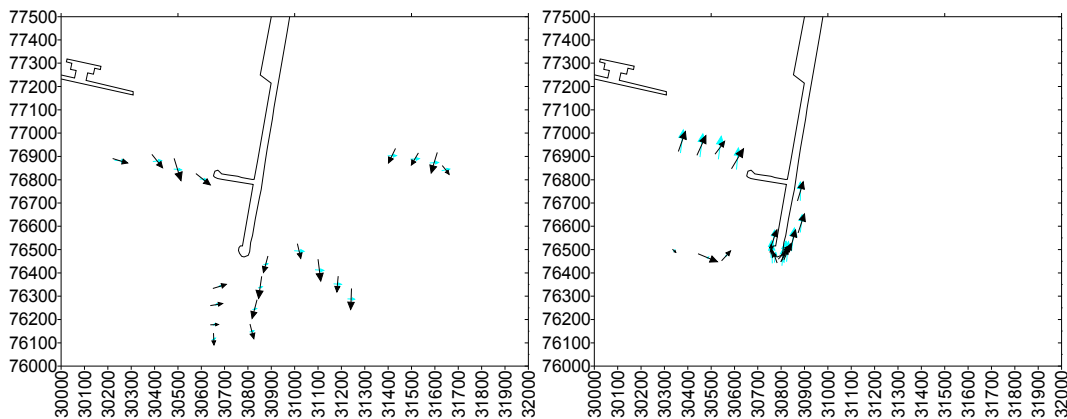


Figura 7-16. Flujos promedio medidos del 17 de Marzo del 2000

7.2 DIFUSIÓN A GRAN ESCALA

Los primeros resultados se presentaron en Díez et al. (1999a), Redondo et al. (2000) y después Platonov (2009). Las imágenes muestran efectos a gran escala de la superficie del mar como grandes manchas o remolinos, con los que se puede estudiar la contaminación y vorticidad de grandes zonas.

La técnica del tratamiento de imágenes se usó con las imágenes de satélite SAR para analizar el comportamiento de las manchas detectadas en el mar. A gran escala, el medio más efectivo de detectar vertidos de hidrocarburos en la superficie del océano es el Radar de Apertura Sintética SAR. La capa de crudo elimina las ondas capilares de la superficie del mar, reduciendo considerablemente las pequeñas ondas gravitatorias y disminuye el coeficiente de rugosidad de la superficie marina hasta 2-3 veces. También la película de petróleo cambia la intensidad y la composición espectral de la luz solar y de las ondas electromagnéticas que penetran en el agua. La capa de crudo de 30-40 m⁻⁶ absorbe completamente las ondas de la luz infrarroja. Las capas más gruesas interrumpen el intercambio de gases entre la atmósfera y el ambiente marino. Por ello se pueden obtener imágenes sin la necesidad de una fuente de iluminación, de forma que la noche o la cobertura de nubes no encubran a los posibles infractores.

Sin embargo, el control no es tan directo, pues no se dispone en la actualidad de un registro continuo de imágenes SAR. Por ello, cuando se localiza una mancha en una zona, se ha de analizar para determinar, en primer lugar, su composición (si se trata de plancton o de hidrocarburo) y en segundo lugar, su origen, mediante una simulación numérica. Por último, identificar las embarcaciones que pasaron por la zona del vertido. Es importante la información adicional de otros sensores y parámetros ambientales, que permiten inicializar modelos de dispersión turbulenta en la superficie del mar. Se presentan experimentos comparativos que permiten calibrar las medidas de difusión y técnicas usadas para identificar las manchas de petróleo.

El estudio de las imágenes por satélite SAR ha demostrado que el vertido de hidrocarburos en el mar es algo habitual más que accidental. Este es un hecho preocupante dado el impacto medioambiental que suponen estos vertidos. Durante los años 1996-1998, se han analizado sistemáticamente tres zonas costeras europeas, dentro del proyecto CLEAN SEAS presentado en Gade y Redondo (1999).

Los resultados constatan, de forma incuestionable, que el área y volumen de los vertidos detectados, de forma rutinaria entre 1 y 100 Km², es casi un orden de magnitud superior al promedio anual de todos los accidentes con volúmenes derramados de crudo entre 10.000 y 200.000 toneladas. La detección de manchas de petróleo mediante SAR sigue de forma clara las rutas habituales de tráfico marítimo.

7.2.1 Identificación de manchas y advección

Los derrames de crudo de barcos son fuentes puntuales en movimiento que producen manchas con dos características:

- Son manchas longitudinales, con un eje de intensidad máxima.
- Una tendencia de aumento de su anchura y la disminución total de la intensidad por su difusión.

En la figura 7.17 se pueden observar claramente dos manchas de petróleo, la inferior corresponde a la estela reciente de un barco en ruta, mientras que la superior está más desarrollada, es más vieja. Esta nitidez de la imagen es posible debido a que sopla un viento uniforme en todo el dominio.

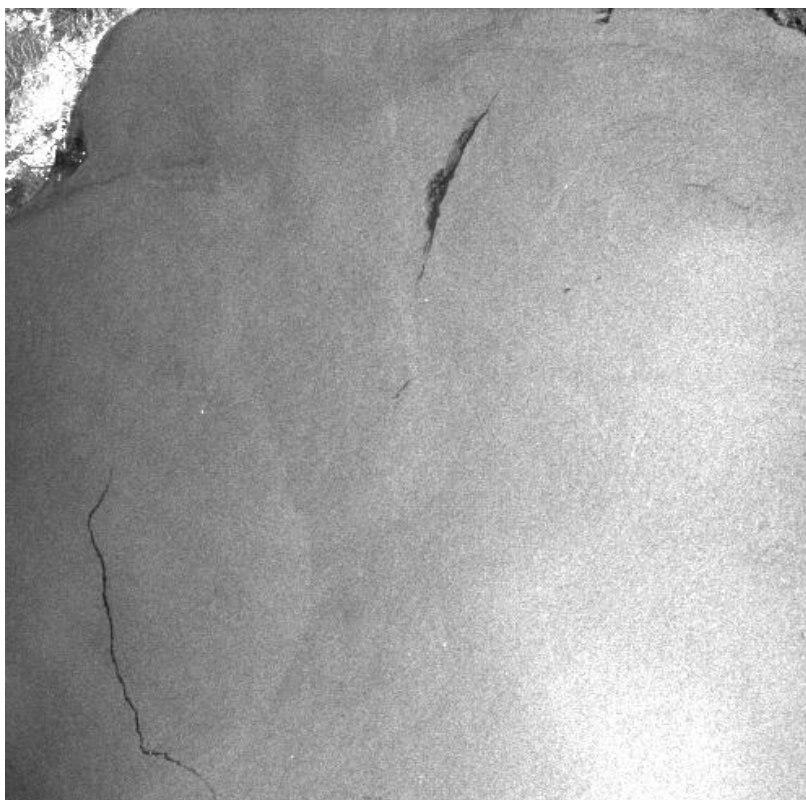


Figura 7-17. Manchas bajo un viento uniforme.

En otros casos hay frentes atmosféricos como los de la figura 7.18 que delimitan áreas con distintas tonalidades. Las partes más claras corresponden a zonas donde sopla el viento con más intensidad. Se puede observar como en su cabecera se acumulan manchas correspondientes probablemente a masas flotantes arrastradas por el viento.

Los procesos oceánicos también se pueden detectar en las imágenes SAR, pues arrastran masas flotantes de origen piogénico como algas o plancton, que actúan como trazadores pasivos que mantienen unas características espectrales similares a las del campo de temperatura o velocidad de la corriente (Seuront et al., 1996). Su origen no suele ser puntual, sino más bien difuso y extenso. Se presentan en “blooms” o masas que tienen la misma anchura a lo largo de su longitud.



Figura 7-18. Frentes atmosféricos.

En la figura 7.19 se puede observar claramente un gran remolino de corrientes oceánicas, según la teoría de Kraichnam de la turbulencia bidimensional, característica de las grandes escalas del orden del radio de deformación de Rossby en el océano.

Los grandes remolinos cuando se desestabilizan transfieren su enstrofia (cuadrado de la vorticidad) a escalas menores. Al mismo tiempo, también se produce una cascada inversa de energía, con uniones de remolinos o vórtices bidimensionales. Las características de la dispersión de contaminantes superficiales dependen de la distribución espectral de la energía entre los remolinos de distinto tamaño. La auto-similitud de los procesos turbulentos en la superficie del océano permite el análisis fractal de las características geométricas de las imágenes SAR. En la figura 7.20 se pueden apreciar estos efectos, con una distribución de grandes remolino interaccionando con otros muchos de menor tamaño.



Figura 7-19. Las masas flotantes reflejan la presencia de los grandes remolinos.

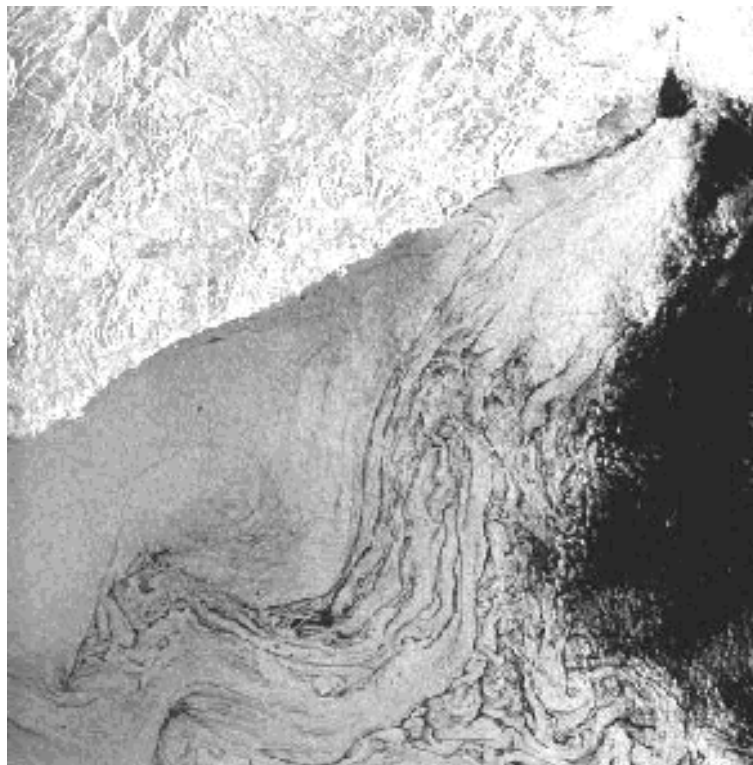


Figura 7-20. Distribución espectral de la turbulencia en remolinos de distintas escalas.

7.2.2 Contaminación marina

Se han analizado las siguientes imágenes obtenidas de diversos proyectos *Clean Seas* de la agencia espacial europea ESA:

- 330 imágenes del área del Mediterráneo Noroccidental de los años 1996 – 1998 del SAR obtenidas de los proyectos C1P.2240: Marine Pollution and surface dynamics in the NW Mediterranean Sea: monitoring, analysis and applications to environmental protection and control of hazardous oil spills and the river plumes.
- 200 imágenes del Báltico de las cuales 142 detectaron vertidos de petróleo con un área total de 522 Km². Project ENV4-CT96-0334.
- 196 imágenes SAR del mar del Norte, de las cuales 127 detectaron contaminación en un área de 72 Km² Project ENV4-CT96-0334.

Los resultados (publicados en Díez et al (2006) *Lecures in Enviromental Turbulence*) permiten llegar a las siguientes conclusiones generales:

- En alta mar se observan las rutas marítimas habituales de los petroleros debido a las manchas y estelas de petróleo, aceites y/o sustancias petroquímicas parecidas por sus propiedades tensioactivas, que aparecen como vertidos oscuros en las imágenes del SAR.
- El área total de todos los vertidos detectados en dicho período es de 1.521 Km², unas 407 tn. Esto indica claramente que la contribución de estos pequeños derrames no es despreciable. Los derrames pequeños “habituales” en alta mar no tienen menos importancia que la de los grandes accidentes, ya que su masa total vertida es incluso bastante mayor.

A partir del análisis fractal se pudo realizar un mapa de difusividad de la zona como se muestra en la figura 7.21.

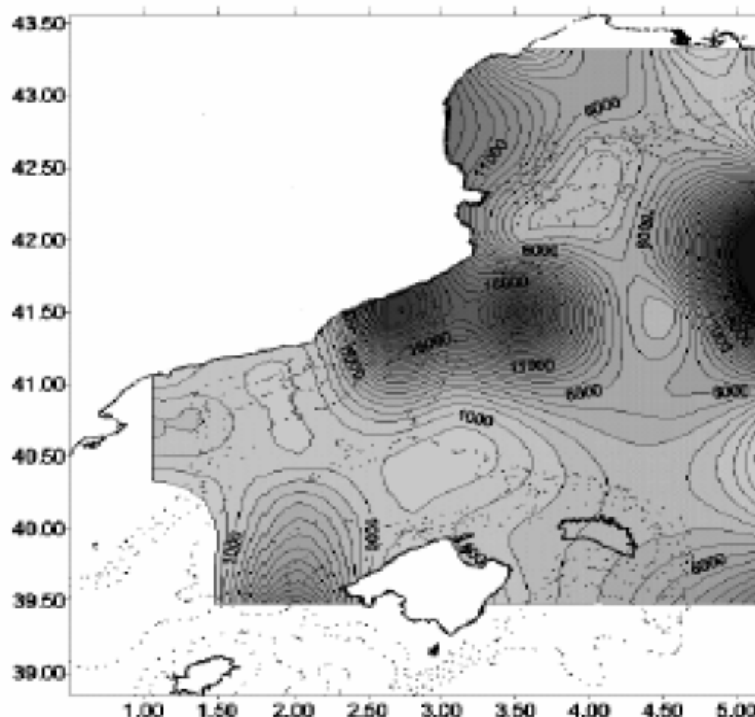


Figura 7-21. Mapa de difusividad en el Mediterráneo NW. Proyecto Clean Seas

7.2.3 Resultados de Vorticidad

Para detectar los vórtices y las escalas asociadas a los movimientos superficiales en el mar, fueron analizadas las imágenes de las cinco zonas mostradas de los años 1997-1998. La figura 7.22 muestra la probabilidad (número normalizado por las observaciones efectuadas) de la detección visual de estructuras en forma de vórtices registrados en los cuadrantes de 5' x 5'. Se ve bien que la mayor densidad de vórtices se observa al Este de Barcelona en el área cercana al cañón submarino de Blanes. Otras áreas con concentración relativamente alta de vórtices y están hacia el Sudeste y Sudoeste de Barcelona y al Sur y Sur – Sudeste de Tarragona, al Oeste-Noroeste de las Islas Baleares.

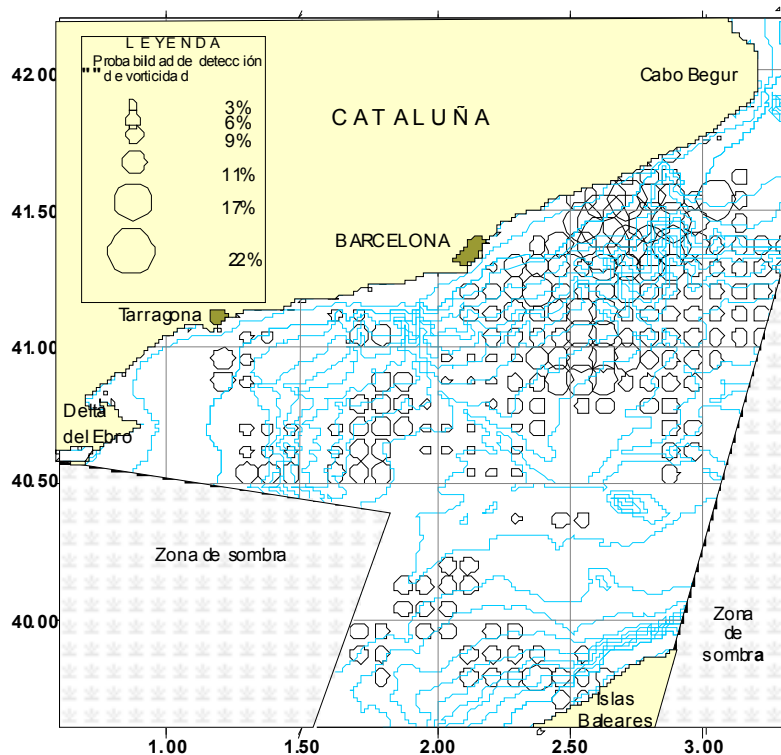


Figura 7-22. Probabilidad de vorticidad del Mediterráneo

La forma y la orientación espacial de 56 remolinos elípticos detectados en las diferentes imágenes SAR durante el período de observaciones. Para visualizar mejor la estructura batimétrica del fondo marino, los “thalwegs” de los cañones submarinos han sido marcados con líneas verdes. La mayoría de los vórtices están situados en una franja marítima relativamente cercana a la costa continental (Figura 7.23). Se nota una correlación entre las posiciones espaciales de los remolinos y los cañones submarinos: la mayoría de los vórtices están situados al lado izquierdo de los cañones submarinos. La mayoría de los vórtices detectados tienen forma elíptica y ocupan un área menor de 100 km². Se nota una tendencia a la disminución de los tamaños de los remolinos desde el Nordeste hacia el Sudoeste, hecho que puede ser asociado a las inestabilidades generadas por los cañones submarinos.

La distribución espacial de los vórtices respecto a los ejes “thalwegs” de los cañones submarinos, según nuestras observaciones, muestra una considerable dependencia entre los remolinos que se encuentran predominantemente al lado izquierdo de los

ejes de cañones, vistos desde alta mar hacia la costa. Este fenómeno se considera como un resultado de los procesos de turbulencia bidimensional debido a la fuerte interacción entre la corriente costera predominante hacia el sudoeste y la influencia de la batimetría de cañones submarinos en la conservación de la vorticidad potencial (Zatsepin et al., 1996).

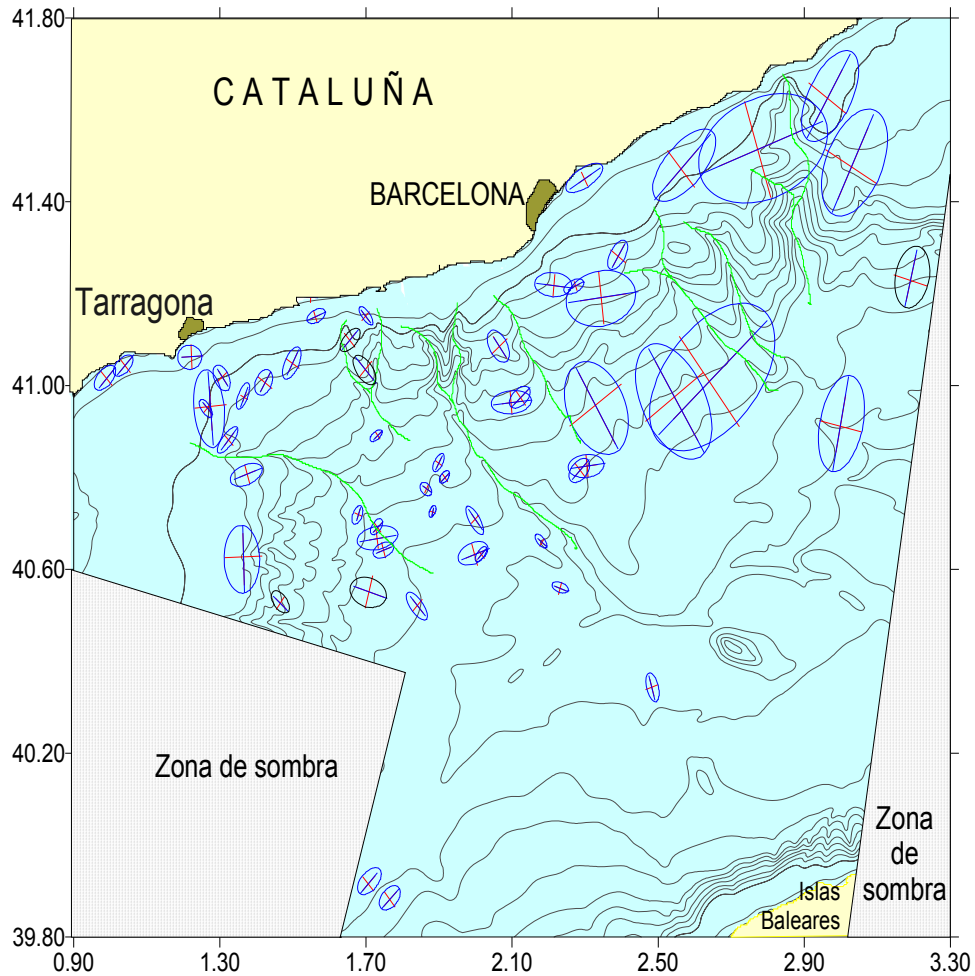


Figura 7-23. Proporción de los vórtices y las direcciones de sus ejes. Matulka 2009.

7.3 EVOLUCIÓN DEL OLEAJE EN ZONA DE ROMPIENTES

Aquí se presentan los resultados experimentales de transformación de la energía del oleaje mediante el análisis espectral de la zona de costa (NearShore), de rompientes (Surf Zone) y zona de orilla (Swash Zone), de la barra de Trabucador en el Delta del Ebro, publicados en Mosso et al. (1998).

En la propagación de la energía, el oleaje, al acercarse a la costa, se transforma aumentando la altura de ola y la pendiente (shoaling) hasta llegar a la ruptura, que produce una disipación y provoca una disminución de la altura de ola. La energía asociada se transforma y da lugar a distintos fenómenos físicos con distintas escalas hidrodinámicas (gradientes del tensor de radiación responsables del set-up, set-down, corrientes, corrientes de borde y transporte de sedimentos). Cierta cantidad de energía se transfiere a otras frecuencias, una parte a altas frecuencias en forma de turbulencia y otra a bajas frecuencias como ondas infragravitatorias o corrientes longitudinales.

En Delta 96 se hizo un estudio experimental para analizar esa transformación. Se estudió la evolución del espectro de energía cuando un tren de oleaje se propaga hacia la costa. En la zona de costa y de rompientes, los sensores de presión y correntímetros dieron buenos resultados, pero en la zona de orilla, tan solo las imágenes de vídeo resultaron eficaces.

7.3.1 Sensor de presión de altura de ola

Para transformar los datos del sensor de presión a altura de ola, primero debe hacerse un filtrado y después una conversión, (Bishop y Donelan, 1987). En el pre proceso se resta la media para eliminar tendencias como la marea y se filtra con una resolución de baja frecuencia de 0,008 Hz (60 s) y una alta frecuencia de (2 s) 0,5 Hz. El límite de la frecuencia de corte fue determinado por medio de un detallado análisis espectral de la serie de presión, que no mostró picos (oscilaciones) más allá de 32 segundos. A continuación se hace una conversión hidrodinámica basada en la teoría de ondas de pequeña amplitud:

$$\eta = n \cdot \eta_p \frac{\cosh(kh)}{\cosh k(h+z)} \quad \text{Ec. 7-1}$$

donde η es la fluctuación de la superficie de nivel medio del mar, η_p es la presión medida, k es el número de onda, h es la profundidad del agua, z es la posición del sensor cuando el eje vertical se toma con el origen sobre el nivel de agua y n es un factor de corrección.

En esos experimentos, una serie de sensores de presión y medidores de oleaje se encontraban a lo largo de la vara, algunos de ellos en la misma posición, lo que permite una comparación entre el oleaje obtenido de la serie de presión y el medido directamente con los sensores de oleaje. Se realizó la conversión de los sensores de presión a niveles de superficie libre con dos métodos; el Grace y el método MLFM (figura 7.24).

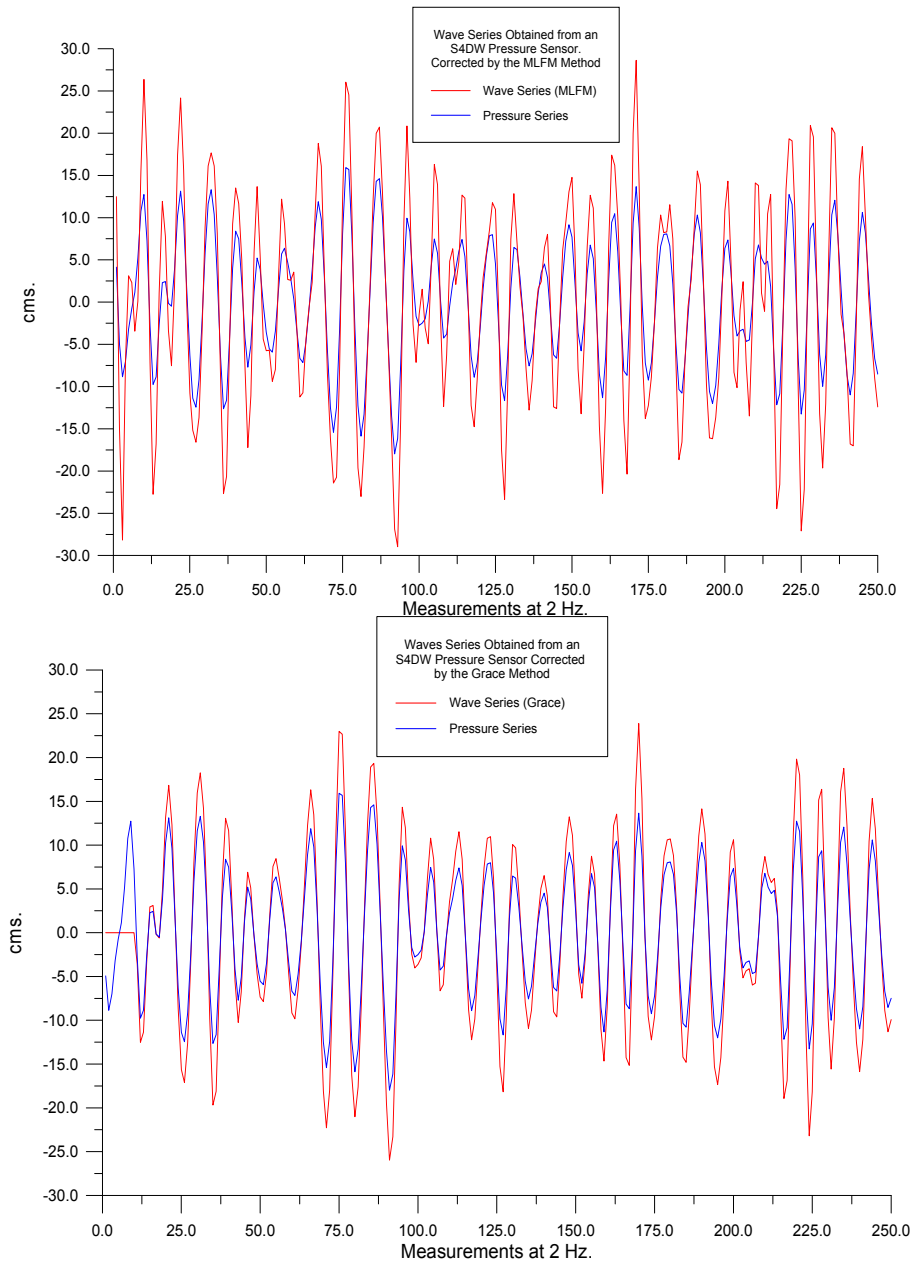


Figura 7-24. Oleaje de la serie de presión por el método MLFM (arriba) Grace (abajo).

Aunque los dos métodos dan buenos resultados y parámetros espectrales muy similares, el método de Grace se adapta mejor a la serie de tiempo de campo de onda medido que el método MLFM. El método MLFM es más sensible a cualquier cambio de dirección en las oscilaciones del agua de mar, dando, en algunos casos, olas mayores donde hay poco oleaje. El resultado de esto es que el espectro obtenido desde el método MLFM da algunos picos en frecuencias más altas, mientras que el método de Grace no lo hace (Figura 7.25).

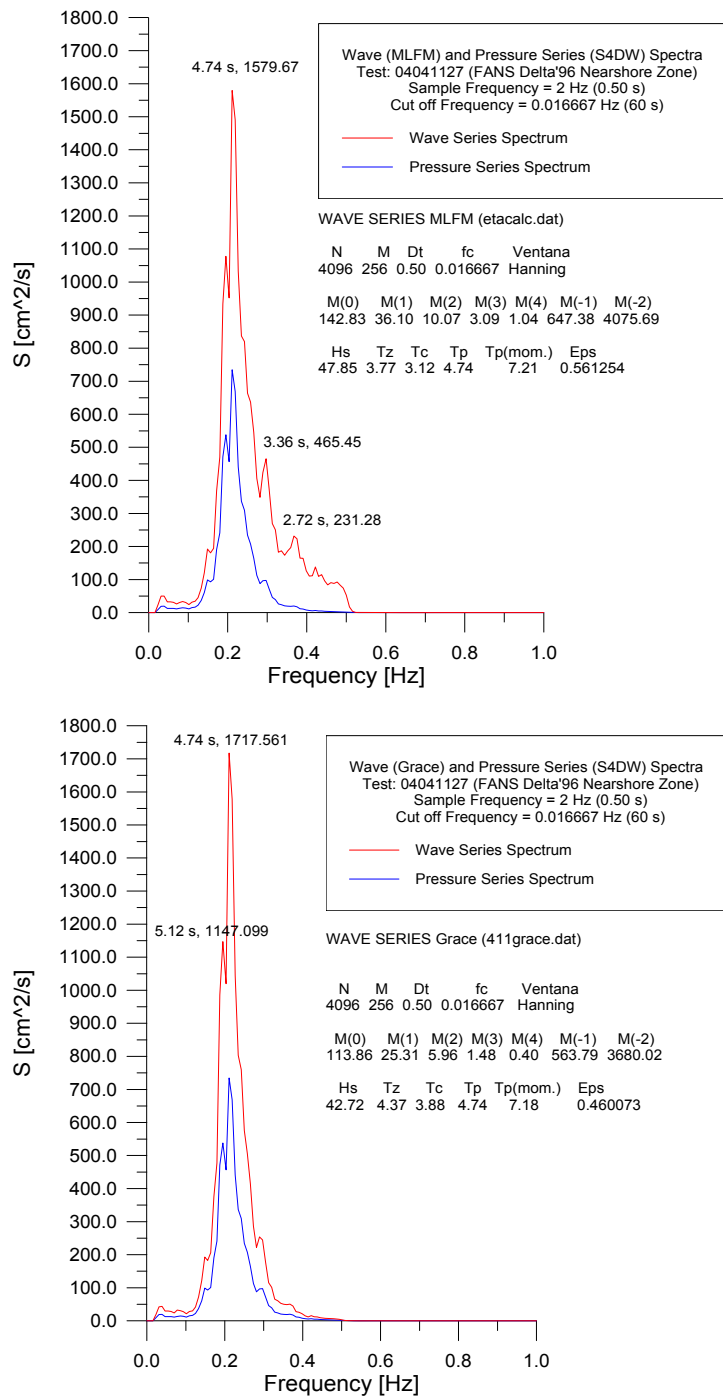


Figura 7-25. Espectro obtenido por el método MLFM (arriba) y por el de Grace (abajo).

7.3.2 Sensor de nivel

El sensor de nivel tiene una fila de pares de electrodos colocados en una varilla vertical a intervalos fijos (5 cm) y aislados unos de otros, que según estén sumergidos o no transmiten o no permitiendo identificar el nivel de la superficie libre. El espectro puede verse en la figura 7.26.

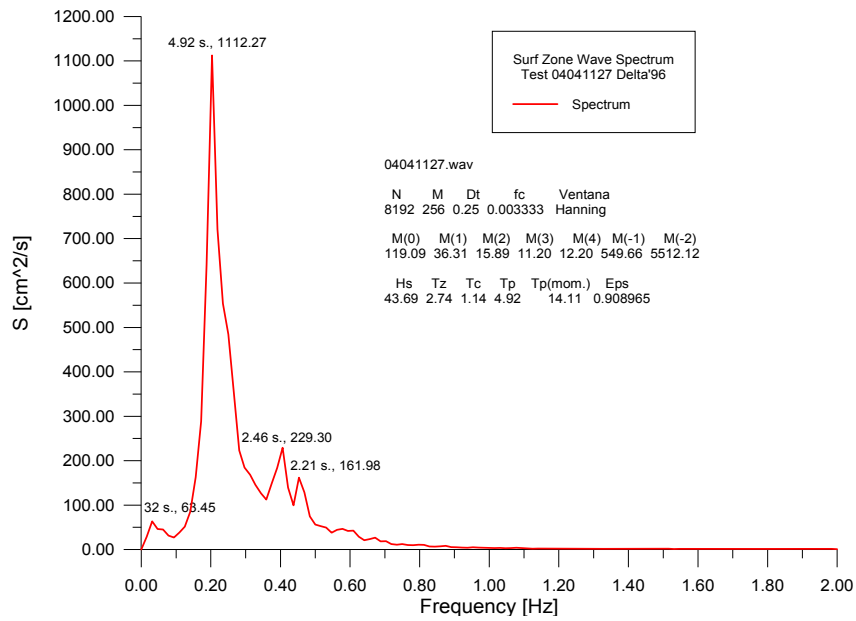


Figura 7-26. Espectros de energía durante la prueba 4 de 4/Nov./Delta96.

7.3.3 Análisis de imágenes

Usando técnicas de análisis de imágenes se puede analizar una ventana completa del campo de oleaje en el mismo momento para identificar variaciones topológicas en lugar, o bien se puede analizar la evolución temporal de un número relativamente pequeño de puntos. En virtud de la reflexión de la luz, se puede establecer una relación lineal entre la luminiscencia observada y la pendiente local de la superficie del mar. De la imagen resultante de la serie temporal de una línea (figura 7.27) se puede cuantificar el run-up/run-down.

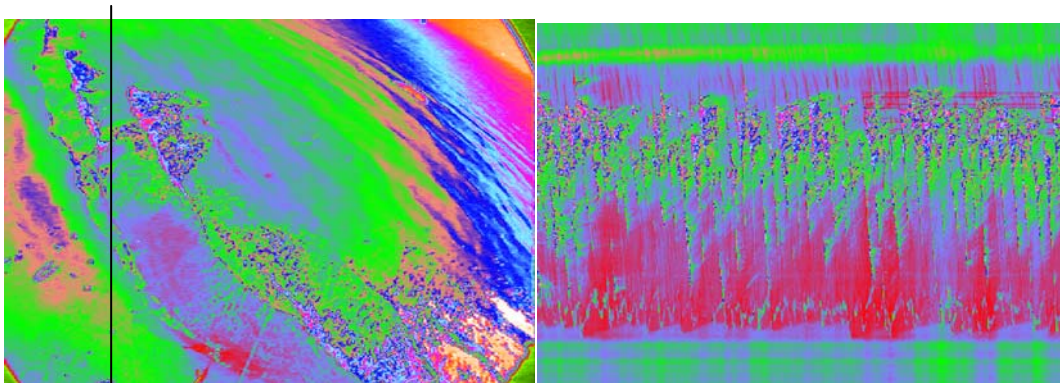


Figura 7-27. Serie de eje horizontal es el tiempo y la vertical es el perfil de playa.

A partir de las oscilaciones que se proyectan sobre la topografía se puede obtener una idea de sus alturas mediante una transformación de coordenadas (Diez et al., 1998). Si se aplica una transformada de Fourier a la serie temporal, se obtiene un espectro de la intensidad. Si se transforman las intensidades en altura de ola, se obtiene un espectro de energía del oleaje (figura 7.28).

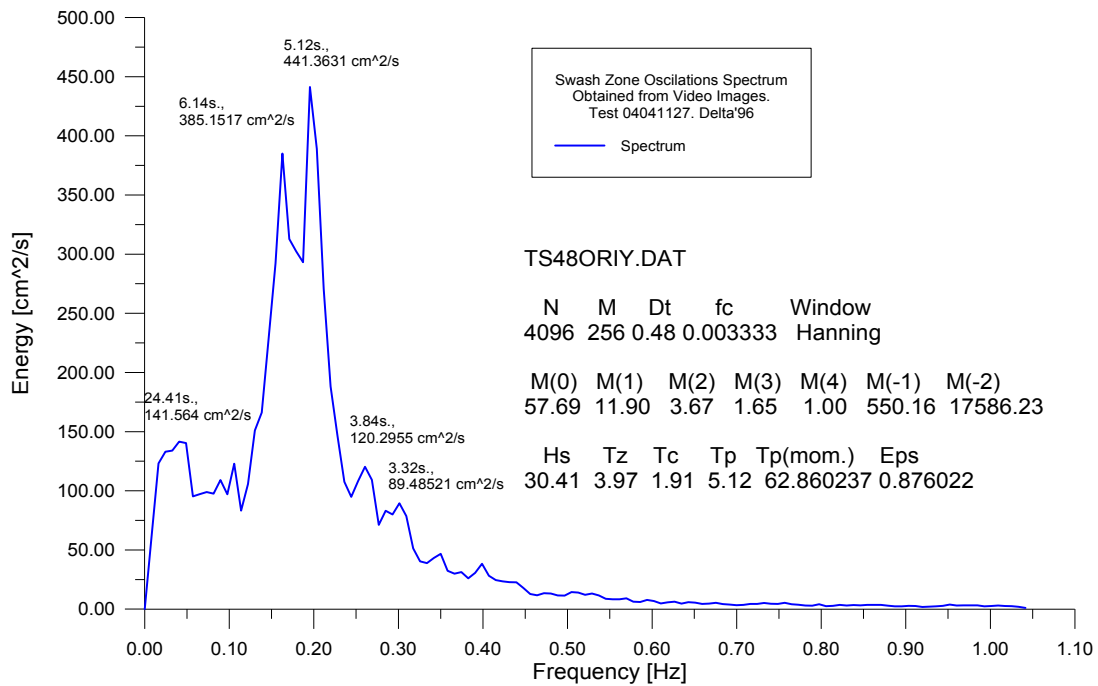


Figura 7-28. Análisis espectral a partir de imágenes de vídeo de la zona de swash

7.4 IDENTIFICACIÓN DE CORRIENTES.

En los experimentos de Delta 96 se identificó una corriente de retorno en la rotura de la barra de arena en la zona de rompientes, gracias al seguimiento de trazadores: boyas y manchas, que atravesaban la barra por el mismo tramo.

La cuantificación de las trayectorias y velocidades se realizó tomando una sucesión de imágenes completas, con un periodo de 10 segundos, durante unos 8 minutos (figura 7.29). Al principio, las boyas se hallaban agrupadas y resultaba difícil distinguirlas, pero a medida que transcurría el tiempo se iban separando, avanzando de forma ordenada, en fila india.

En cada una de las imágenes instantáneas se determinó la posición de las boyas visibles, grafica en la figura 7.30. Se puede observar que la intensidad máxima de la mancha y las boyas siguen un comportamiento distinto: la mancha es transportada longitudinalmente sin describir la celda de retorno que siguen las boyas. Ello se debe a que la trayectoria de la mancha describe el comportamiento euleriano, mientras que la de las boyas describe un comportamiento lagrangiano.

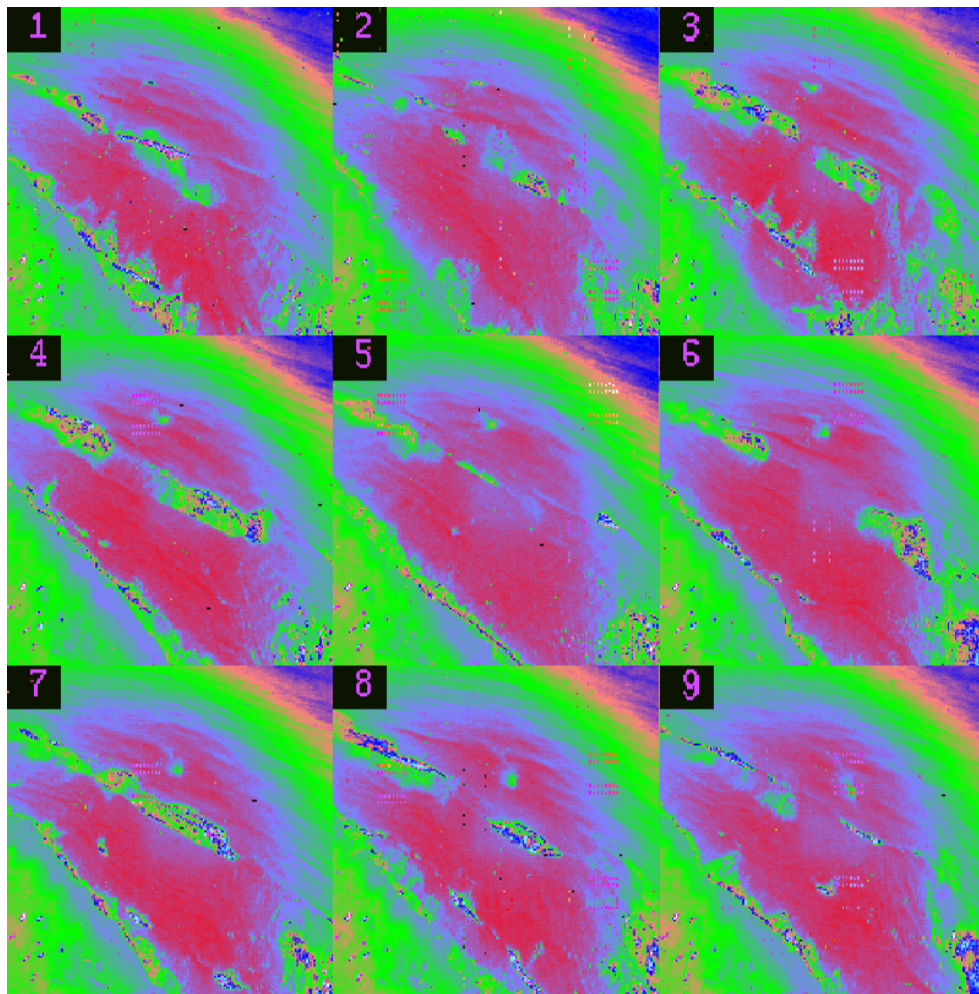


Figura 7-29. Secuencia de imágenes de la evolución de boyas y mancha.

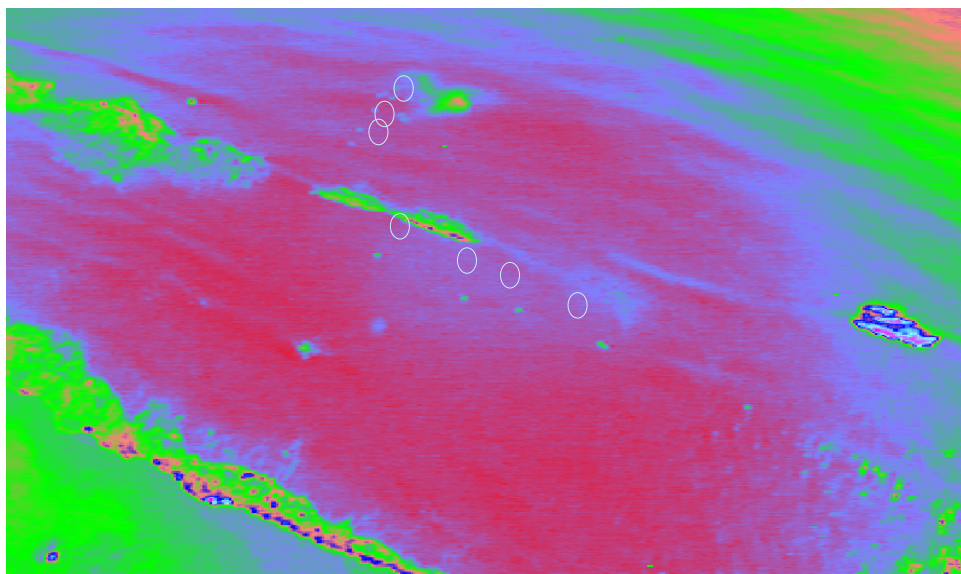


Figura 7-30. Mosaico de ventanas instantáneas de la evolución de la boyas.

En las figuras 7.31 y 7.32 se representan las componentes de la velocidad de una de las boyas en relación al tiempo. En la zona de rotura de la barra se dan velocidades transversales de hasta 70 cm/s, mientras que la corriente longitudinal era de unos 20 cm/s. Las condiciones meteorológicas no indican ningún agente impulsor que explique esta corriente transversal.

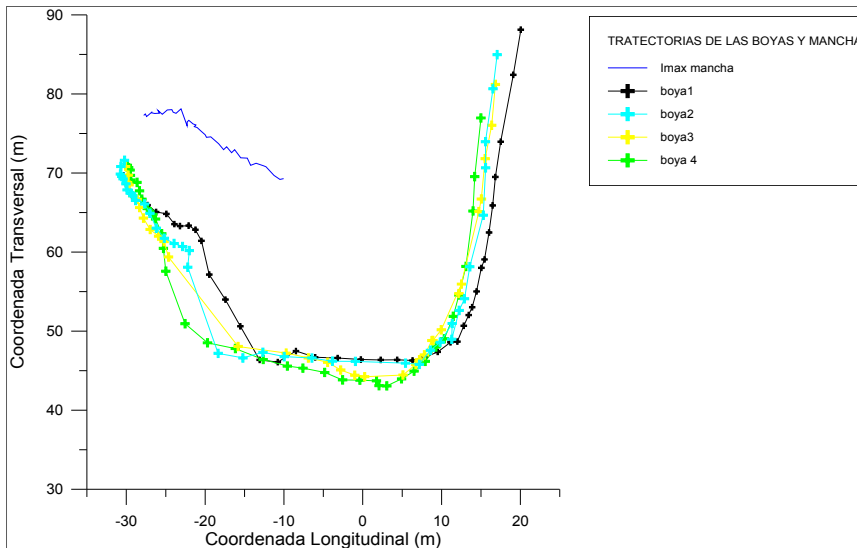


Figura 7-31. Trayectorias de las boyas.

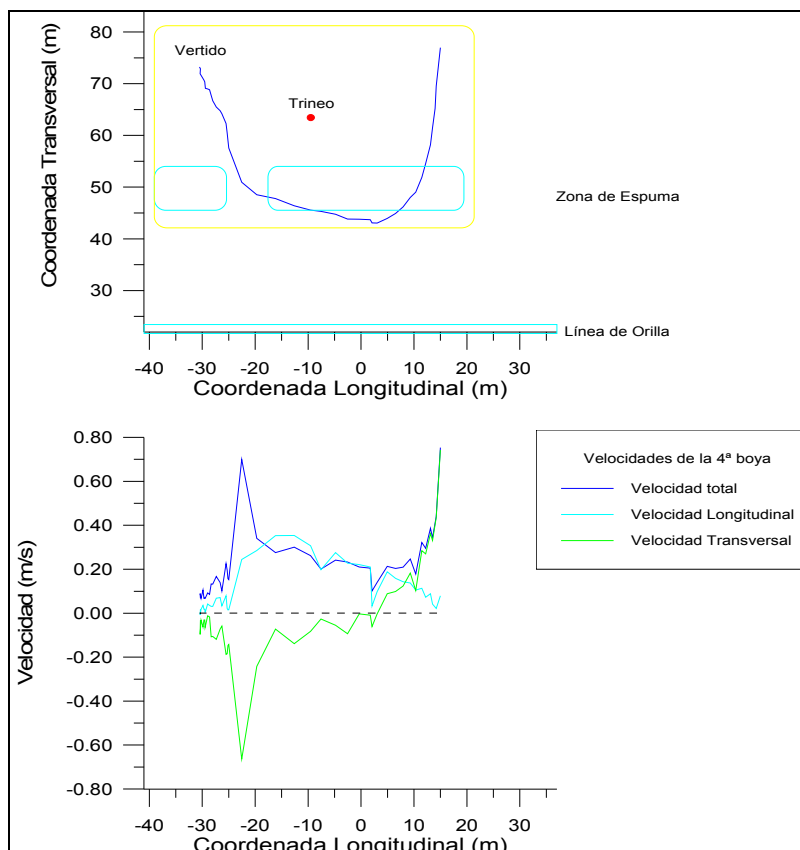


Figura 7-32. Velocidades de una boya.

Para identificar la corriente durante los experimentos de Delta 96 se vertió una mancha de forma lineal transversalmente a la orilla para ver como la deformaba la corriente y visualizar la celda que producía. Efectivamente, la mancha se deformó en forma de “U” describiendo la misma trayectoria que las boyas como se puede ver en la figura 7.32.

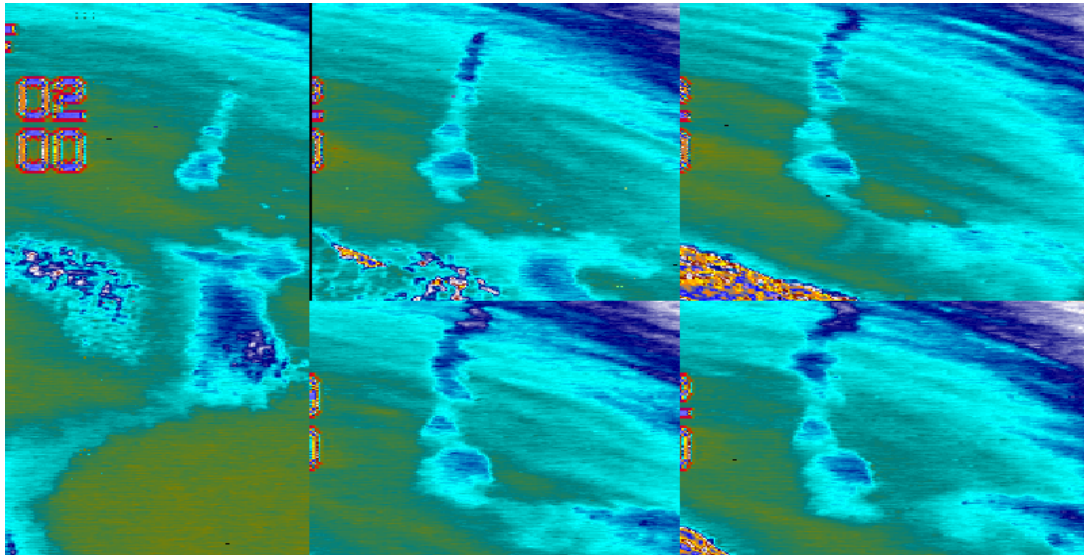


Figura 7-32. Deformación de una mancha lineal.

El análisis de las condiciones hidrodinámicas, a partir del espectro obtenido con las velocidades de los correntímetros del tetrápodo situado en la zona costera (Figura 7.33), indica que se trata de condiciones de muy baja energía, insuficientes para generar una corriente de hasta 70 cm/s, (Arthur, 1962).

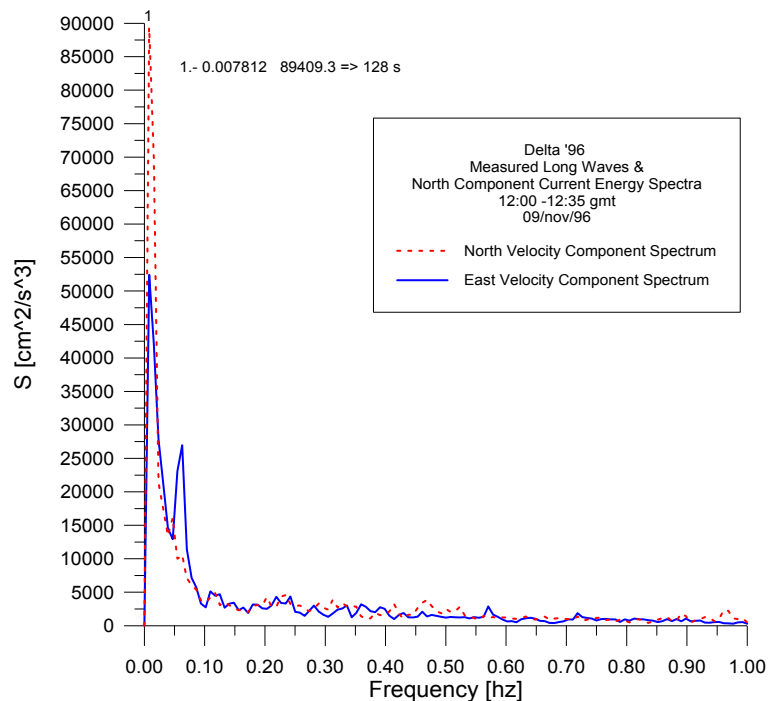


Figura 7-33. Espectro de velocidades en la zona costera.

7.5 OTRAS CARACTERIZACIONES MORFOLÓGICAS

Mediante imágenes de vídeo de la zona de rompientes (ZR), es posible estudiar distintas características del oleaje y la evolución que sufren éstas a medida que se acercan a la orilla. Entre las características más destacadas figuran:

La dirección de las crestas. A partir de unas imágenes de calidad (resolución y contraste) es fácil identificar las crestas del oleaje de tipo “sea” y “swell”. Con una función de transformación de coordenadas se puede controlar la evolución de la dirección del oleaje desde donde empieza a ser perceptible hasta la línea de orilla y en todo el ancho que abarque el dominio del campo visual. Haciendo una serie temporal de una columna de píxels correspondientes a una sección de la ZR, es posible identificar las olas y sus características; por ejemplo la pendiente de las olas a lo largo de la serie temporal representa su velocidad de avance. En la figura 7.34 se puede observar que se producen “Y” de olas atrapadas por otras más rápidas, debido a que tras la rotura se produce una dispersión frecuencial del oleaje.

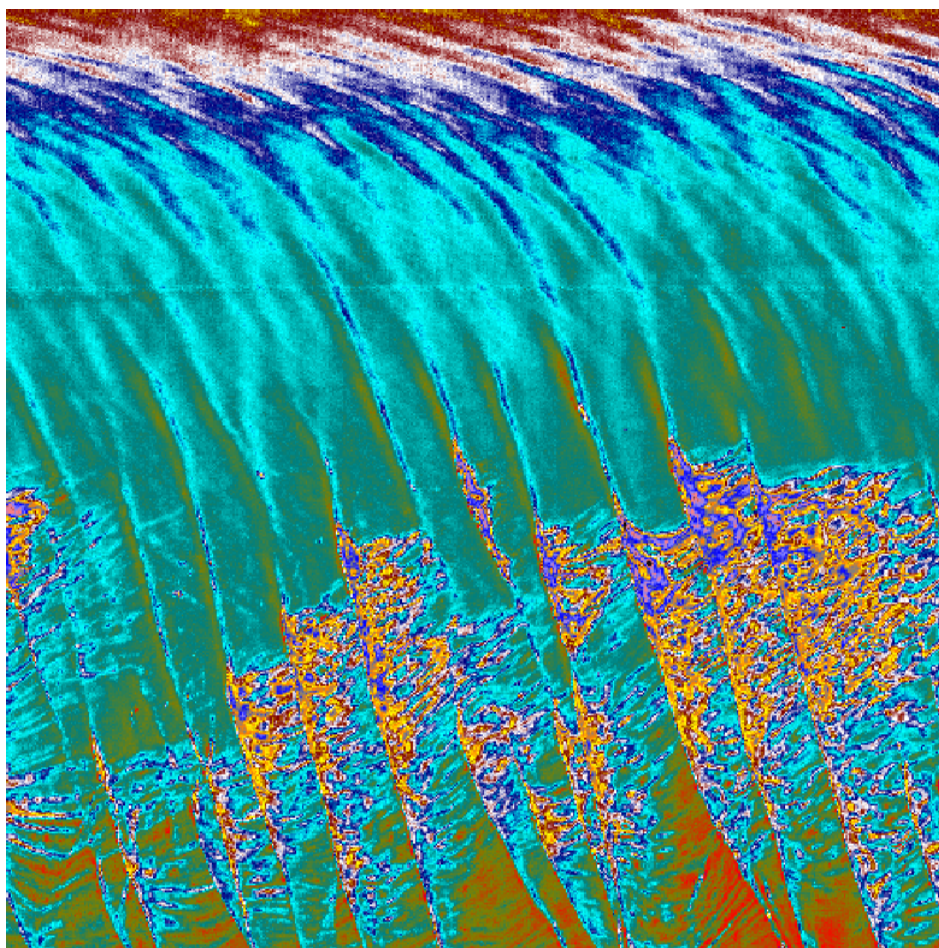


Figura 7-34. Serie temporal con olas atrapadas.

Determinar la posición de la orilla no es trivial. Para hacerlo exactamente, hay que digitalizar las posiciones de la espuma y transformar las posiciones a cotas. Gracias a la transformación de coordenadas y a la batimetría se puede cuantificar “setup+runup” de una serie temporal y es posible obtener el espectro de energía de esta zona. La diferencia entre la línea de orilla y la de rotura define el ancho de la zona de

rompientes, mientras que la distancia entre los mínimos y máximos de la línea de orilla se considera el ancho de la zona de swash.

Por otro lado, el oleaje al romper produce espuma, lo que supone un excelente trazador para el análisis digital de imágenes de vídeo. Realizando un promediado durante un número significativo de olas (figura 7.35), unos 10 minutos, se puede ver la distribución espacial de la espuma. Para calcular la fracción de olas rotas se debe pasar un filtro on/off que asigna un valor de 1 para intensidades superiores a un umbral a partir del cual se determina que hay espuma y 0 para los valores inferiores, donde no hay espuma. Así pues, el valor de la intensidad promediada en cada punto es una medida relativa del tiempo con espuma. Ponderando por el periodo del oleaje y el tiempo de exposición se deduce la fracción de olas rotas. Por lo tanto, además de controlar la propagación direccional del oleaje, un análisis de este tipo permite deducir información indirecta de la batimetría de la zona de rompientes (ZR) por irregularidades longitudinales.

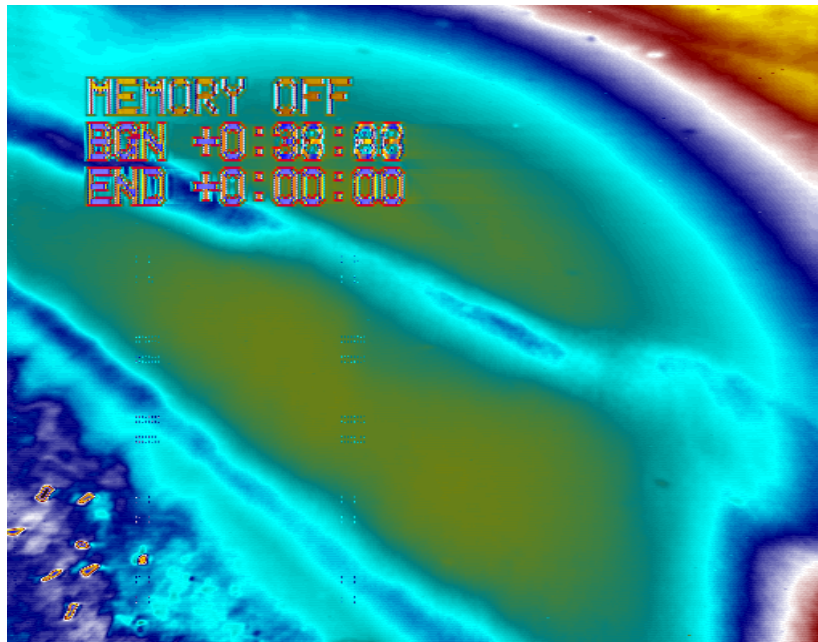


Figura 7-35. Promediado temporal de las imágenes digitalizadas durante 5 minutos.

Una vez caracterizado el oleaje medio con altura H , periodo T y celeridad c , el coeficiente de difusión K de la zona entre la orilla y la barra (a una distancia L usada como escala de longitud) se puede obtener en función de la velocidad de fricción del viento u_* , como:

$$\bar{K} = \frac{HL}{T} f\left(\frac{u_*}{c}\right) \quad \text{Ec 7.2}$$

7.6 MODELADO NUMÉRICO

La simulación numérica permite reproducir el comportamiento de un vertido si se conocen las condiciones ambientales (Viento, Corrientes, Oleaje, Temperatura, etc.) y las características del vertido (Viscosidad, Volatilidad, Densidad, etc...).

El análisis se puede hacer:

- A posteriori, calculando su punto de vertido y su antigüedad.
- A priori, prediciendo su trayectoria y dimensión para su confinamiento en caso de vertidos accidentales.

El modelo de dispersión LAD-3D (Mestreset al., 1998) está basado en una aproximación lagrangiana (conjunto de partículas) de la ecuación de convección-difusión en 3D. Interpretando esta expresión como una ecuación de Fokker-Planck, puede obtenerse una ecuación diferencial estocástica que es consistente con la ecuación de advección-difusión. La nueva ecuación se utiliza para desplazar un conjunto de partículas discretas que representan el contaminante, y cuya posición, transformada a distribución continua, da una imagen precisa del perfil de concentraciones resultante de la dispersión.

LAD_3D ha sido validado utilizando varios test sencillos y datos reales correspondientes a campañas de campo como los de Delta'96 en zona de rompientes, para comparar las trayectorias y velocidades de las boyas y la mancha y compararlos con los simulados por el programa. En la figura 7.36 se puede ver la superposición de los resultados obtenidos mediante la simulación numérica calibrada con los datos hidrodinámicos experimentales y los resultados del análisis digital de una serie de imágenes tomadas cada 10 segundos.

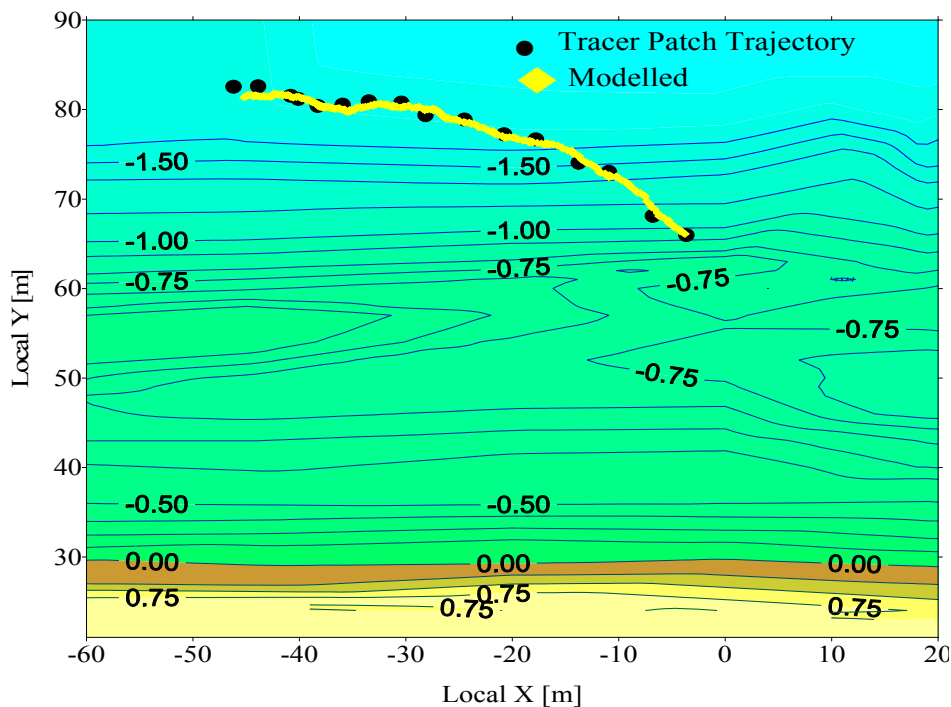


Figura 7-36. Comparación de las trayectorias en la simulación y las imágenes

En la figura 7.37 se compara la evolución del tamaño real y el modelado numéricamente con diferentes coeficientes. Se observa como el tamaño de la mancha es muy sensible a la determinación del coeficiente, especialmente para manchas desarrolladas. Por otro lado, en sentido transversal la variación no es tan notable. También se observa como a partir de los 350 seg el tamaño empieza a decrecer, ya que el grado de dilución alcanza el umbral de detección.

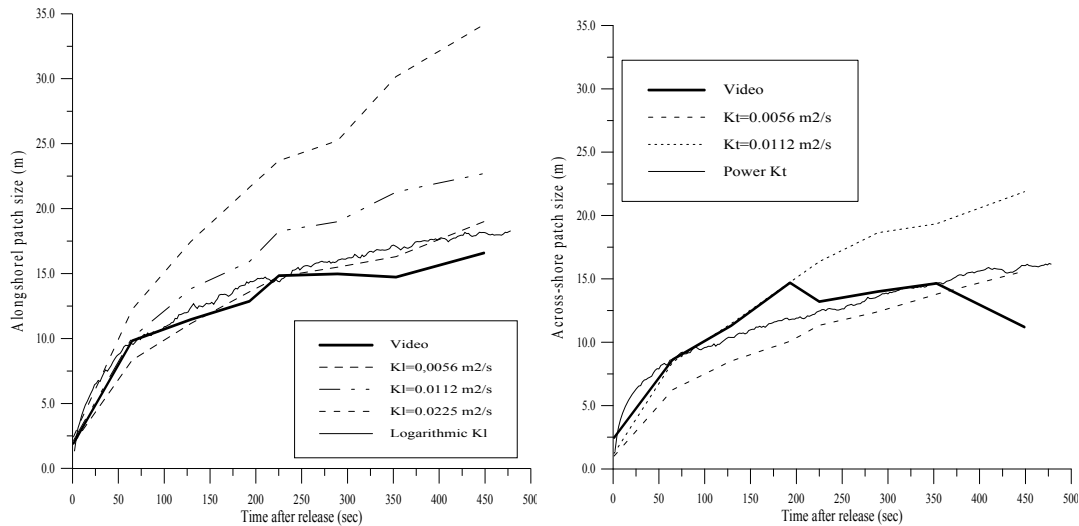


Figura 7-37. Comparación entre el tamaño de una mancha en Delta 96 y la simulación numérica con diferentes coeficientes de difusión en dirección longitudinal y transversal

En cuanto a la trayectoria seguida por la mancha, la simulación numérica, da un buen resultado, con diferencias inferiores al metro (figura 7.38).

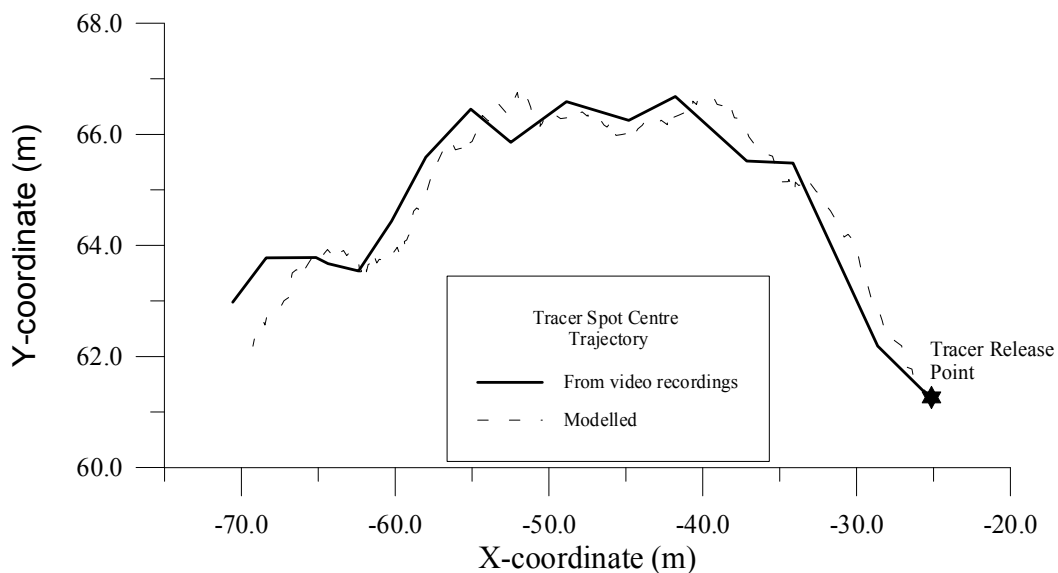


Figura 7-38. Trayectoria del centro del trazador modelado con 20,000 partículas, cada 2s

Otro modelo de simulación diseñado especialmente para vertidos de hidrocarburo es SPILLSIM. El modelo se basa en una simulación cinemática de la turbulencia (Castilla 2001) con modificaciones específicas para simular el campo de turbulencia en la superficie del océano tanto en el dominio bidimensional de cascada inversa de la energía como en la región a escala más pequeña donde dominan los aspectos de difusión y mezcla por turbulencia tridimensional.

El modelo de simulación cinemática utilizada se describe en Castilla (2000, 2001) y es similar a la simulación utilizada por Fung et al. (1992) y Malik et al. (1993,1999). Se puede aplicar este modelo directamente a los derrames de crudo al mar para relacionar el crecimiento de la dimensión fractal máxima de un derrame en el tiempo durante su tiempo de residencia (Redondo et al. 2008 y 2009).

La comprensión de las propiedades de transporte y la mezcla de contaminantes pasivos, o en general de los trazadores en los flujos de líquido es de gran importancia práctica en diversos campos de las ciencias ambientales e ingeniería. El método de rastreo de partículas o seguimiento de boyas en el océano, durante su movimiento contenido en el dominio de medida o volumen capaz de devolver un conjunto útil de medidas de velocidad Lagrangianas están asociadas con el flujo de partículas en lugar de limitarse a su situación, es decir, en coordenadas Lagrangianas. La dispersión de los contaminantes es un ejemplo de un fenómeno natural que se describe de forma Lagrangiana. De hecho, los contaminantes actúan como marcadores de partículas de un fluido, por lo que una vez que son liberados avanzan en el campo como un escalar y se puede seguir de una manera pasiva el campo de velocidades, y analizar su escala espacial.

El software básico está programado en FORTRAN Standard para Unix/Linux con salidas gráficas están en formato gráfico .GIF. Está adaptado a las entradas y salidas del modelo DIFUSOIL – SPILLSIM y distintos modelos ajustando tanto el mapa de velocidades promedio, condiciones de contorno y niveles de turbulencia ambiental a partir de diversas generación de mallas de velocidad y de difusividades turbulentas a partir de datos reales o predicciones (HIRLAM, WAVE, etc.)

La precisión del modelo depende de la calidad de los datos para inicializar los campos de velocidad superficial y de difusión en función de las escalas a parametrizar, se considera apropiado un mínimo de 10 vectores en el campo de 50 Km x 50 Km utilizado.

El modelo de predicción de corrientes es de advección difusión tipo euleriano, forzado por el viento. Para poder definir el campo instantáneo de velocidades y su evolución en el tiempo es necesario utilizar una predicción numérica adecuada a la escala y a la zona de estudio y un sistema de asimilación de datos reales, sobre todo en las predicciones.

El modelo óptimo en el caso de una buena descripción inicial del campo de corrientes superficiales marinas es el obtenido a partir de la ecuación de la vorticidad de los vórtices a mesoescala (del orden del Radio de deformación de Rossby Rd según se describe en Carrillo et. al. (2004). El espectro de energía utilizado es el de la figura 7.39

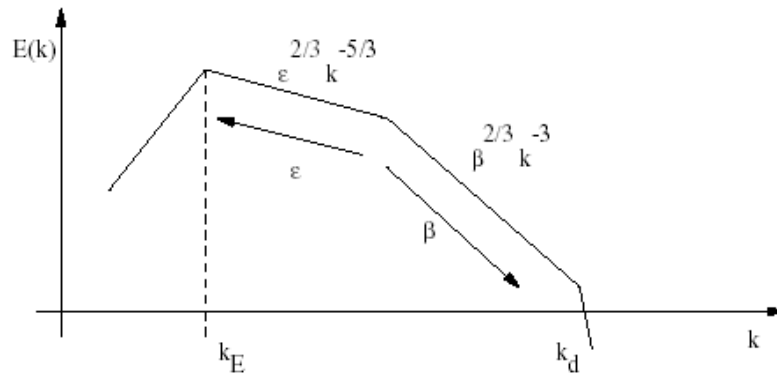


Figura 7.39 espectro de energía

Posibles aplicaciones futuras al modelo de simulación, la depuración y aumento del rendimiento operativo mediante de un zoom en la malla de calculo inicial (50x50 Km) y diversas subrutinas adicionales que permitan condiciones iniciales de la mancha de petróleo de cualquier forma (no solo elípticas). Además existen una serie de condicionantes locales, batimetría, mapas de viento y su evolución, fase de la marea, corrientes significativas a distinta profundidad, etc., que serian importantes a pequeña escala y deberían implementarse.

Un ejemplo de la evolución de una mancha de crudo se ve claramente en la visualización gráfica de imágenes (figura 7.40). Se trata de una mancha alargada que se desplaza unos 3-4 Km en 12 horas con una corriente de 5 a 22 cm/s alargándose y distorsionándose poco a poco. (Redondo et al 2009)



Figura 7-40. Modelado numérico (spillsim) de la Deformación de un derrame de crudo real.

Los valores de dimension fractal maxima o de complejidad de la forma de la mancha de crudo pueden compararse con los valores maximos de la distribución multifractal de ejemplos reales, tal como se realizo por primera vez en Gade y Redondo(1999) ver ejemplo en la figura 7.41.

Los cambios del área del vertido hipotético y de su forma son notables, siendo este una estimación a la alza ya que no se modela la degradación del crudo. La difusividad turbulenta superficial es anisotropita pero se puede estimar de forma global a partir de la variación del área del orden de 50 - 300 m²/s para derrames de tamaño de unas decenas de kilómetros. Las relaciones entre aspectos geométricos, detectables por ordenador y las características medioambientales locales mostradas en las figuras 7.41 permiten una mejor evaluación y análisis de los vertidos reales detectados mediante SAR, así como mejorar los procesos de asimilación de datos en las predicciones de vertidos accidentales (Tarquis et al 2011, Redondo et al 2009)

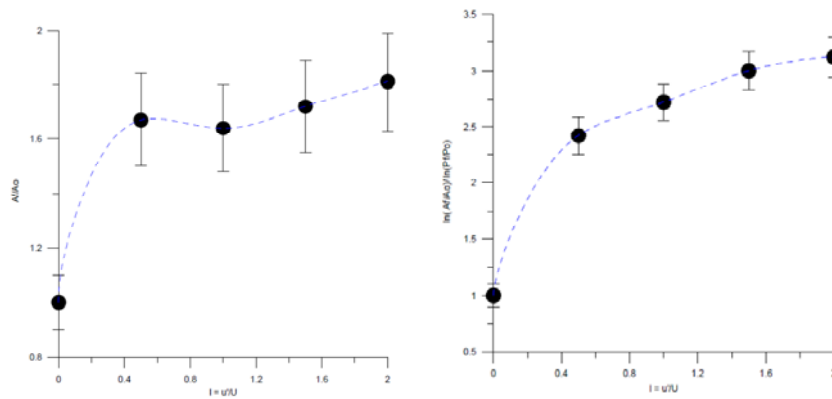


Figura 7.41 Ejemplos de evolución de dimension fractal de Redondo et al (2008) y Tarquis et al. (2011)

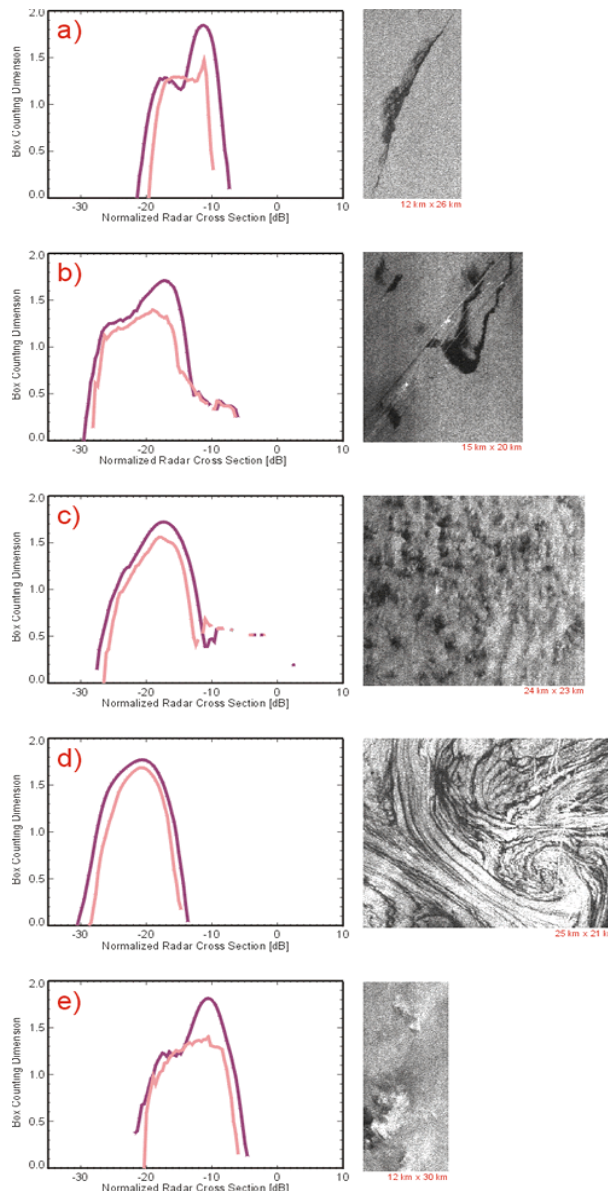


Figura 7.42. Ejemplos de distintas distribuciones de dimensiones fractales para manchas de petroleo y otras características superficiales en imagenes SAR (Gade y Redondo 1999)

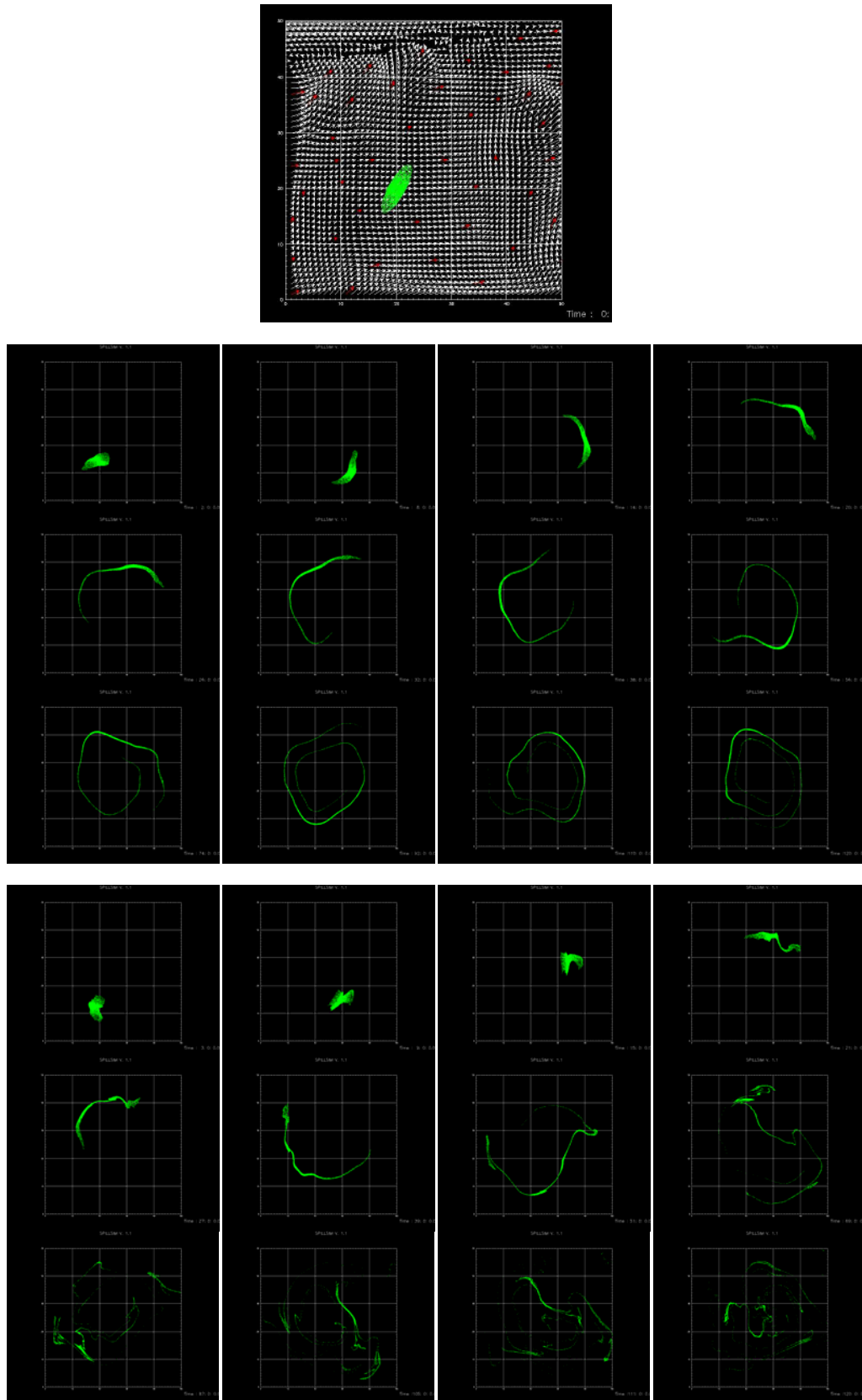


Figura 7.43 secuencia de deformación de una mancha de origen natural (arriba) y de un vertido de crudo (abajo).

En las figuras anteriores, podemos observar la diferencia de las características topológicas de sliks naturales y de derrames de petróleo. Las técnicas avanzadas de visualización de flujos permiten la identificación de vórtices o de células de Langmuir. Los diferentes orígenes de las manchas se reflejan en su topología y por tanto en su dimensión fractal $D(r)$ Gade y Redondo (1999). Otros parámetros multifractales pueden estar relacionados con los mecanismos físicos que afectan a la intensidad de un escalar en la identificación de flujos, como en Castilla (2000) y Redondo (1990), donde se muestra que la estratificación está afectada por la máxima dimensión fractal.

Las correlaciones de los valores de intensidad y la integral radial de estos L , indican la escala espacial donde las intensidades SAR se correlacionan bien. Si suponemos que las corrientes superficiales son responsables (al menos en parte) de la distribución espacial de la rugosidad del océano por dos razones principales: primero, la pendiente a ambos lados de un remolino es muy diferente a la producción de retrodispersión de radar de un lado (como sucede con ERS-1 / 2 y ENVISAT y RADARSAT), esta escala de longitud de los flujos del medio ambiente está estrechamente relacionado con el radio de deformación de Rossby (Platonov y otros, 2008, 2009), y puede ser utilizado para evaluar la difusividad.

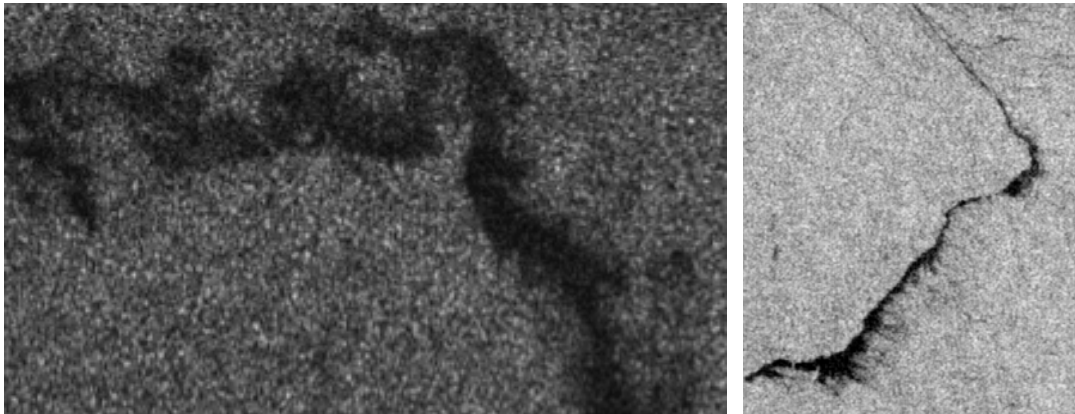


Figura 7.44. Imágenes SAR de alta resolución con vertidos de crudo.

Por ejemplo, el vertido de crudo en la izquierda de la figura 7.44, en una resolución más alta con ASAR correspondería a una serie temporal no-dimensional T_{oil} entre 0,7 y 0,8 correspondiente a la dimensión fractal de 1,3 a 1,4. Hay otros indicios que pueden ser útiles a partir de las observaciones SAR, tales como el viento local suave en el momento que se tomó la imagen. No hay un patrón consistente que distinga a los vertidos recientes de crudo y de las manchas de flotantes naturales que se han adaptado al flujo turbulento multi-escala de la superficie del océano.

La figura 7.45 es similar a la última imagen de la figura 7.43, pero la intensidad turbulenta local es mayor, (con una firma espectral que se muestra en la figura 7.40) por lo que se ve fácilmente que la convolución son mayores y la dimensión fractal es mayor. En la figura 7.44 (derecha) se ve una imagen (15 Km x 21 Km) del SAR del ERS-1 del 24 de Agosto de 1997 de un área en la parte Occidental del Mar Balear. El derrame ya está transformado mediante las corrientes y otros fenómenos hidrometeorológicos locales y ya lleva tiempo en el medio marino. El borde más oscuro e intenso de la mancha indica su desplazamiento hacia Noroeste bajo la acción del viento moderado desde Sudeste.

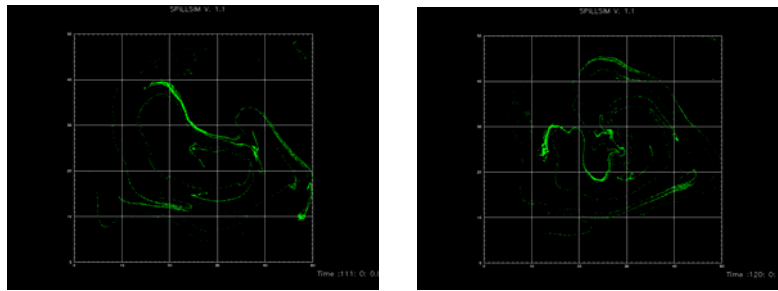


Figura 7.45. KS simulation de dispersion en un medio turbulento

Las observaciones experimentales de las características se han analizado con técnicas fractales multi-escala para extraer información relevante sobre las características espectrales de la mezcla y difusión. Tanto la densidad como la concentración de trazadores o vertidos de crudo pueden ser investigados en detalle usando la función de estructura de tercer orden, lo que indica una fuerte cascada inversa hacia la gran escala produciendo variaciones espectrales, la influencia del tipo de cascada turbulenta (2D o 3D) y de la influencia de la intermitencia en el espectro de energía y en la descripción de los coeficientes de difusión se describen de forma teórica en la discusión de esta tesis y en el apéndice 1.

Analizando modelos con distinto nivel de intermitencia y de espectros entre $5/3$ y 3 se comprueba que la complejidad y la dimensión fractal de la mancha de crudo aumenta en el tiempo hasta estabilizarse en una dimensión fractal definida en el plano $D_2=1,4-1,6$. Cuanto mayor la intensidad de la turbulencia en el modelo más rápidamente se alcanza la dimensión fractal máxima. La evolución temporal reflejada por la dimensión fractal máxima puede ser una Buena medida del tiempo de residencia de un derrame de crudo en el mar Redondo et al (2007).

8 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se discuten los resultados obtenidos en el capítulo anterior y se analiza su concordancia con las leyes teóricas que describen los diferentes fenómenos.

También se analizan los experimentos, las posibilidades y potencial de la técnica de análisis de imágenes.

Algunos de los capítulos anteriores son sobre todo teóricos y descriptivos. Los primeros capítulos nos sitúan en la complejidad de los procesos hidrodinámicos y turbulentos, los siguientes en las campañas de campo realizadas para identificar dichos fenómenos y en los últimos se analizan los parámetros obtenidos. Pero es necesario evaluar críticamente todo ello, con el fin de ver las ventajas e inconvenientes de cada sistema de medida y la idoneidad de los parámetros estudiados, para tratar de explicar los procesos que intervienen y analizar estos resultados en base a las teorías existentes.

8.1 EVALUACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE MEDIDA

8.1.1 Sistemas de captación

Las principales ventajas de las técnicas ópticas son:

- Su capacidad de adquirir información sin interrupción ni interferencia en el flujo ya que es una técnica no intrusiva.
- Se toman datos de una zona, no solo de un punto.
- Són relativamente baratas, en comparación con el coste del instrumental (sensor de oleaje o correntímetros).
- Son muy flexibles, se adaptan a múltiples escalas, desde ondas capilares a mareas. Tan solo es cuestión de definir el campo visual y la resolución necesaria.

Sin embargo, los sistemas de vídeo poseen limitaciones que deben ser consideradas a la hora de ser usados, y que se describen a continuación:

En general, hay tres técnicas bien conocidas: el láser, el vídeo y la estéreo fotogrametría.

El láser permite obtener información de una o dos dimensiones por la refracción del rayo láser que pasa a través de la superficie del agua. Los escáneres láser son muy precisos, pero no pueden grabar directamente las elevaciones de la onda de superficie. Normalmente se utilizan para medir las ondas más cortas. Por otro lado, su capacidad de penetración es especialmente útil para el seguimiento de partículas y es la técnica más usada para el análisis del comportamiento de fluidos en laboratorio (Particle Tracking).

El análisis digital de imágenes de video obtiene información unidimensional dependiente, por la intensidad de la luz, de un sensor de imagen. Se basa en considerar que la reflexión o refracción de una fuente de luz registrada como intensidad es proporcional a la pendiente de la onda. Esta técnica se ha ampliado a las componentes bidimensionales, permitiendo la reconstrucción de topografía de superficie. Sin embargo tiene los siguientes inconvenientes:

- Dependencia de la fuente de iluminación, normalmente el sol, y las distorsiones generadas como reflexiones, paso de nubes, etc., que pueden alterar la intensidad y generar efectos topológicos no deseados. Si bien hay cámaras infrarojas, éstas son muy caras.
- No permiten enfoques muy lejanos (1-2 km) de resolución adecuada.
- Necesidad de la restitución de las imágenes a verdadera magnitud.
- Dificultad de detección de objetos y de bordes.

La estéreo fotogrametría también permite medir la superficie con mucha precisión y es la que se usa para determinar velocidad (tráfico) o para la restauración de patrimonio arquitectónico. Se basa esencialmente en el concepto de triangulación, en el que pueden restituirse objetos tridimensionales a partir de dos imágenes correspondientes a dos perspectivas de la misma zona. Puede aplicarse a una amplia gama de escalas espaciales y no se limita a las condiciones de campo o de laboratorio. Sin embargo, presenta problemas por la necesidad de obtener el doble de imágenes y porque éstas

deben identificar puntos iguales con perspectivas lo suficientemente diferentes como para poder realizar la triangulación y calcular su posición. El equilibrio entre la cobertura espacial y la resolución de altura limita el rango de longitudes de onda medibles. En caso de reflexiones de luz, no es posible la determinación geométrica. En estos casos, una tercera cámara puede ayudar a resolver las ecuaciones.

8.1.2 Equipo

ANALÓGICO O DIGITAL

Un sistema de vídeo digital es más complejo que un sistema analógico, ya que los soportes, cableado, software, digitalizador, etc no siempre son compatibles, mientras que el sistema analógico está mucho más sistematizado. Las normas y estándares de televisión han creado un mercado de plug-and-play para cámaras analógicas y digitalizadores donde componentes de muchos fabricantes operan juntos. Otro inconveniente es la dificultad para determinar los requisitos del sistema y la necesidad de un digitalizador de gran capacidad.

Las cámaras analógicas conectan con un solo cable coaxial delgado que pueden abarcar largas distancias; en cambio, las cámaras digitales tienen sus propios requisitos de cable exclusivo, añadiendo a la complejidad de la solución que suelen ser cables pesados, numerosos, cortos y difíciles de alargar o interconectar. Por consiguiente, para grabaciones a gran distancia habitualmente se emplean cámaras analógicas y se almacenan las imágenes digitalmente.

Sin embargo, la mayor resolución y velocidad de las digitales hacen que sea la solución preferida para aplicaciones que requieren imágenes de mayor resolución, mayor escala de grises, velocidades de fotogramas más rápidos y mejor calidad de la señal que la que se puede encontrar con una cámara analógica estándar.

COLOR O BLANCO Y NEGRO

Las cámaras en blanco y negro tienen el triple de contraste para la misma resolución, es decir una escala de intensidad tres veces mayor, ya que el color está formado por una combinación de tres colores básicos. Normalmente son RGB (Rojo, Verde y Azul), o CYM (Cyan, Amarillo y Magenta). Por ello, para analizar parámetros que se correspondan con una intensidad luminosa, el Blanco y Negro es mucho más recomendable.

8.1.3 Mecanismos de elevación.

GRÚA

Se trataba de una grúa con una pluma extensible de hasta 40 m. de largo. La pluma estaba controlada por un ordenador desde la cabina, de modo que podía volver a colocarse en la misma posición cada día con una precisión del orden del cm. Cada día era necesario reajustar su posición, pues por su propio peso caía algún cm.

La pluma se colocó formando un ángulo de aproximadamente 30° respecto a la perpendicular y a 45° de ángulo vertical; la altura de la pluma era de 22,3 m. y la distancia total al suelo de 27,3 m (ver figura 8.1). La cámara se ancló en el extremo

mediante una base atornillada prevista para dos cámaras (una en blanco y negro y otra en color). Del extremo de la grúa colgaba una cesta para ajustar enfoques. Las imágenes se transmitían por cable al magnestoscópio.

Las imágenes tomadas desde la grúa son oblicuas y, por tanto, tienen mayor distorsión debido a la inclinación de la superficie. Por otro lado, la grúa es más manejable, cómoda, menos delicada y da una imagen que no se mueve.



Figura 8-1. Grúa empleada en la campaña Delta'96 para elevar las cámaras de vídeo.

GLOBO

Se trataba de un globo de PVC de 4 m de diámetro hinchado con 4 tanques de Helio que tenía un empuje teórico de 15 kg. De su polo Norte salían tres cabos y repartidos por su ecuador diez más. Todos los cabos se recogían en un mosquetón. De éste se suspendía una cadena de un metro hasta el baricentro de un triángulo de aluminio que servía de base. El objeto de esta cadena era ganar estabilidad frente a pequeñas oscilaciones del viento al aumentar la inercia del soporte. Debajo de éste punto estaba la cámara en color (ver figura 8.2). De los extremos del triángulo salían tres cabos (de perlón de aproximadamente 1 mm de diámetro y de 100 Kp de resistencia). Dos de los cabos estaban anclados a tierra mediante muertos de hormigón con un carrete que permitía recoger y dar cabo. El tercero estaba anclado en el mar mediante una boya y su longitud no era regulable.

Debido a la escasa resistencia del globo había que proceder con mucho cuidado para que éste no pinchara. Se lleno de helio progresivamente y sin tocar en ninguna pared, para evitar perforar el PVC. A medida que se iba hinchando se distribuían las tensiones de los tirantes. Para rellenar las posibles fugas de Helio había una válvula, pero no fue necesario utilizarla. Después, se ataron todos los cabos al mosquetón y éste a la cadena con la base y la cámara.

Por la noche había que bajarlo para reducir los efectos del viento. Como lastre se usaron las propias botellas de Helio. Su posicionamiento tuvo que estimarse a partir de

dos puntos de posición conocida con un teodolito y se calculó la altura (aproximadamente 35 m).

El montaje es complicado y requiere mucho cuidado debido a la escasa resistencia del globo. Además es poco manejable y difícil de controlar, el viento lo mueve y la imagen no es fija. Esto implica que hay que elegir las imágenes de los momentos en que el globo con su balanceo pasa por el mismo punto. Los resultados obtenidos en Delta'96 son bastante buenos ya que, a pesar de que había algo de viento, la imagen no se mueve mucho.

Las imágenes obtenidas desde el globo tienen una visión cenital de la zona de medición incluyendo la mancha. Esto permite eliminar el efecto que produce la ola al inclinar la superficie; por tanto, con las imágenes cenitales, se puede aplicar la misma metodología para calcular difusión transversal que longitudinal. Así se pueden comparar datos sin tener la incertidumbre del error del método que se tenía anteriormente con la grúa, debido a la filmación oblicua.



Figura 8-2. Globo con la cámara suspendida sobre la zona de rompientes.

MÁSTIL

En la campaña Delta'97 se trabajó en la zona de la pluma de la desembocadura del río Ebro. La interfase entre agua salada del mar y agua dulce del río era muy marcada, con un gran contraste de color remarcado por una rotura de olas debido al cambio de densidad. Las manchas de trazadores se tiraron dentro de la pluma, en la zona donde estaba el tetrápodo, para coordinar medidas. Como trazador se usó leche con fluoresceína.

Las cámaras se anclaron sobre una base de aluminio en forma de T situada sobre la cruceta superior del mástil, a unos 10 m de altura (Figura 8.3). Se colocó una cámara en cada ala de la T y el alma de ésta se ancló sobre la cruceta. Las cámaras estaban inclinadas unos 45° hacia abajo mirando a estribor.



Figura 8-3. Grabación desde lo alto del mástil.

El monitor que tenía que mostrar lo que se estaba registrando tenía una conexión floja y no era posible visualizar lo que se estaba grabando. Ante la duda de si se trataba de un problema del monitor o del registro, se grabó adicionalmente con una cámara portátil. Para ello, había que subir atado con un arnés, pero el movimiento del mástil a esa altura era considerable y por tanto, el de las imágenes también. Una vez en el laboratorio se vio que no era un problema del monitor sino que los magnetoscopios habían sido manipulados y el modo de grabación se había modificado.

Las manchas sufrían una gran advección alargándose a gran velocidad dejando una gran estela alargada en forma de cometa. Debido a ello, la mancha desaparecía del campo visual de las cámaras fijas en pocos minutos. En cuanto a la cámara portátil, ésta permitía seguir el campo de la mancha, pero con mucho movimiento y lejos de los puntos de referencia.

8.1.4 Metodología de las campañas de campo

Los experimentos de campo son costosos y complejos, por ello en la organización es fundamental tener en cuenta:

En cuanto a la metodología cabe destacar que el éxito y la complejidad de las medidas se deben a la adquisición armónica de gran número de datos con diferente instrumental. Ello permite su calibración, validación y comparación en distintas situaciones.

Lo primero que hay que hacer en cualquier campaña es definir la zona de actuación, resolución espacial y temporal de acuerdo a las escalas de estudio. Estas escalas determinan el instrumental necesario (frecuencia de muestreo, error medio, etc), la geo-referenciación, el soporte del instrumental y su disposición.

Teniendo en cuenta la Ley de Murphy, no hay que dejar nada a la improvisación y tener una planificación detallada y hacer ensayos previos. Se debe tener en cuenta la agresividad del medio para elegir materiales resistentes y duraderos, sistemas de anclaje que eviten vibraciones, intrusiones y movimientos no deseados, etc.

No obstante, hay que asumir que pueden surgir imprevistos. Se debe considerar y disponer de recambios del material y alternativas de disposición por si falla algo. Especialmente hay que tener en cuenta la sustitución de las fuentes de energía y pequeño material fungible de recambio como cables y conectores.

Los aparatos deben calibrarse y sincronizarse previamente y posteriormente, si es posible en condiciones parecidas a las de los experimentos, aunque nunca se puede predecir una calma o una tormenta, por lo que se debe tener paciencia y temple.

Hay que documentar rigurosamente y establecer una nomenclatura común para los diferentes equipos humanos y instrumentales.

Es importante anotar las observaciones que se puedan apreciar y detalles que permitan explicar situaciones inicialmente no detectados, como presencia de algas en el instrumental, paso de nubes o variaciones de luz en las imágenes.

Se recomienda hacer periódicamente backups de las medidas o copias de seguridad para asegurar no perder accidentalmente los datos.

8.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE DISPERSIÓN

8.2.1 Zona de rompientes

En la zona de rompientes los coeficientes de dispersión horizontal pueden variar en condiciones similares hasta un orden de magnitud, aunque se observa una dependencia clara con la distancia a la orilla motivada por la corriente longitudinal así como por las condiciones del oleaje (Figura 8.4). Las variaciones espaciales y temporales pueden cuantificarse de forma similar a un coeficiente de viscosidad turbulenta y ser utilizados en el modelado hidrodinámico de fenómenos costeros tales como la circulación, el transporte de sedimentos y la dispersión de contaminantes.

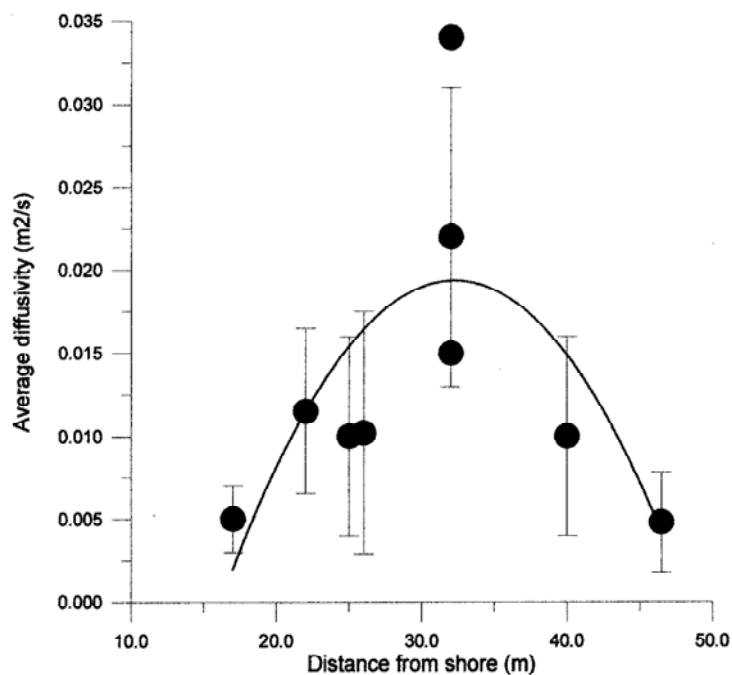


Figura 8-4. Variación del coeficiente de dispersión y la distancia a la orilla.

Según la ley de dispersión de Richardson, el coeficiente de difusión K depende de la tasa de disipación de energía ϵ y al tamaño de la mancha L :

$$K \propto \epsilon^{2/3} L^{4/3} \quad \text{Ec. 8-1}$$

Esta ley no es directamente aplicable en la difusión en Zona de Rompientes debido a que los picos del espectro de energía provocado por la rotura están muy cerca y el subrango inercial es muy pequeño. Sin embargo hay fuertes evidencias de que el coeficiente de dispersión en la Zona de Rompientes depende del tamaño de la mancha L . Horikawa et al. (1978) encontraron que:

$$K \propto L^{1.15} \quad \text{Ec. 8-2}$$

Los resultados de la simulación numérica con el modelo de dispersión 2D DISPER, (Bahia, 1997), se aproximan a los obtenidos por el proceso de digitalización y tratamiento de una mancha real.

El promediado temporal de las imágenes y las series temporales de intensidad en transectos (líneas horizontales o verticales de una imagen) han demostrado ser una técnica conveniente para la caracterización de la dispersión de trazadores, simulando contaminantes, en presencia de olas y corrientes, aún en medios de tan compleja medición como la zona de rompientes.

Los valores observados, y su tendencia, muestran que en el interior de la zona de rompientes no es aplicable una relación directa del tipo “ley 4/3” para el coeficiente de mezcla, ya que el proceso de dispersión es más complejo como se explica en el apartado 8.7.

8.2.2 Turbulencia y dispersión

El transporte de turbulencia de un escalar (concentración de mancha c) en un campo de velocidades v inducido por oleaje o por una combinación de otros agentes como corrientes de cizalla, fricción del fondo o viento se puede considerar, en una primera aproximación, como proporcional a los gradientes de la concentración:

$$\overline{c'v'} = K \frac{\partial c}{\partial x} \quad \text{Ec. 8-3}$$

Para estimar el efecto de la difusión turbulenta inducida por el oleaje se emplea el número de Reynolds de un flujo definido como el producto de la altura de ola incidente H y la velocidad orbital V dividido entre la viscosidad cinemática ν del agua de mar.

$$R_w = \frac{HV}{\nu} \quad \text{Ec. 8-4}$$

La velocidad orbital V puede ser estimada como el cociente entre altura H (o la longitud de onda media λ) y periodo T , ambos parámetros se pueden cuantificar con el vídeo:

$$V=H/T \text{ o } V=\lambda/T \quad \text{Ec. 8-5}$$

La diferencia entre ambos métodos de cálculo depende del peralte $\text{tg}\alpha=2H/\lambda$, que variará en función de si el oleaje rompe o no. La rotura también depende del calado D y del coeficiente de rotura $\gamma =H/D$ ($\gamma=0.78$); pero para playas muy tendidas se puede aproximar por:

$$V = \sqrt{g(H + D)} \quad \text{Ec. 8-6}$$

y entonces R_w es proporcional a $H^{3/2}$ para olas no rotas, y a H^2 para la zona de surf:

$$R_w = \frac{2H^2}{\text{tg}\alpha T\nu} = \frac{\text{tg}\alpha\lambda^2}{2T\nu} \quad \text{Ec. 8-7}$$

Los valores del número de Reynolds correspondiente a cada caso se comparan con los coeficientes de difusión longitudinal y transversal (Figura 8.5).

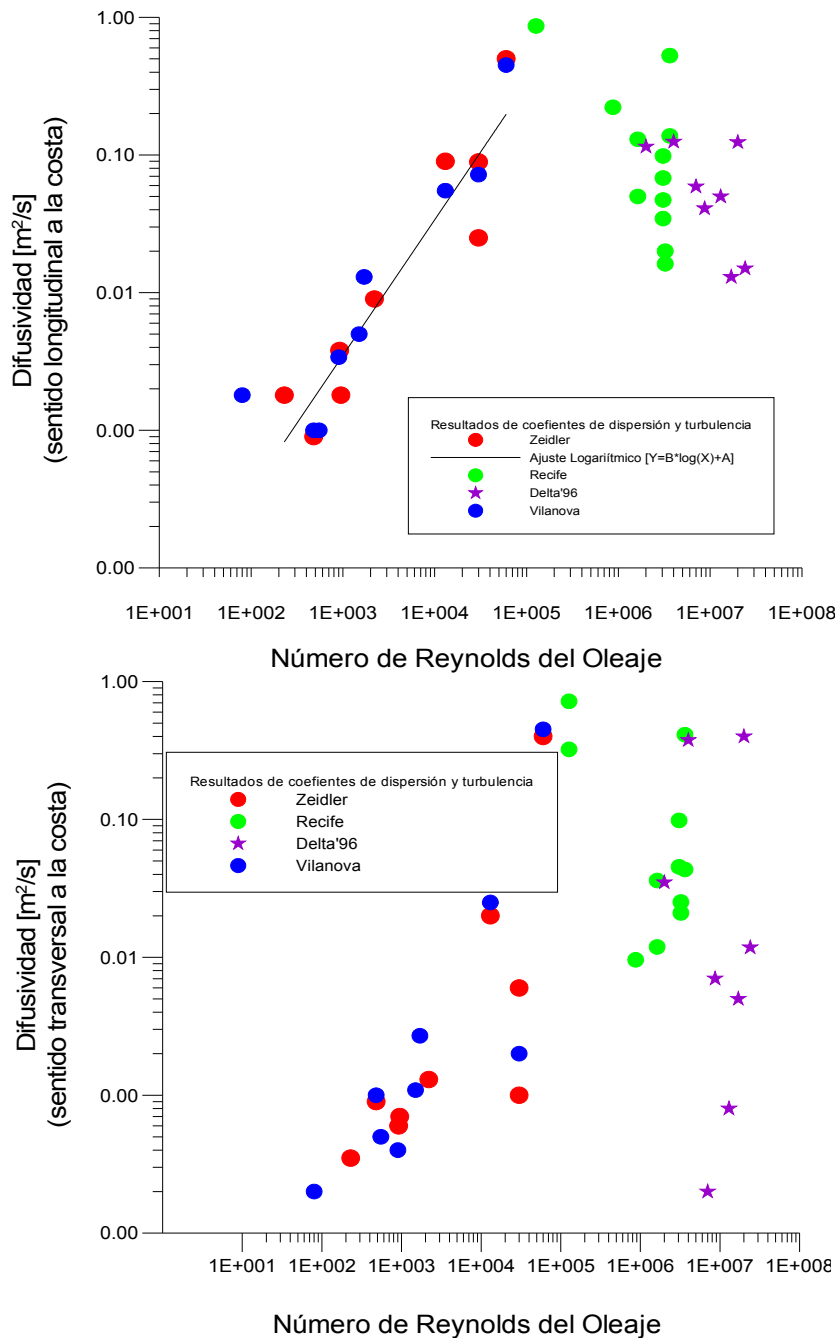


Figura 8-5. Relación del coeficiente de difusión y número de Reynolds.

Los valores del número de Reynolds correspondiente a cada caso se comparan con los coeficientes de difusión longitudinal y transversal (Figura 8.5) medidos.

Los valores medidos también se comparan con los coeficientes estimados por la ley de Zeidler. Según Zeidler (1976) se puede estimar el coeficiente de difusión K según el número de Reynolds $K=cR_w$ para oleaje en un rango de R_w altos, entre 10^3 y 10^6 , sin corrientes longitudinales ni de marea.

El resultado de más de 100 experimentos muestra que hay una cierta dependencia entre la difusividad y el número de Reynolds por el caso de Vilanova: al crecer del número de Reynolds crece el valor de difusividad análogamente a los valores estimados por Zeidler.

Parar Recife y Delta '96, parece que no haya una dependencia definida. En el caso de Recife, la difusividad máxima se alcanza por valores menores de R_e respecto a la difusividad mínima, pero no es posible delinear una tendencia bien definida. Lo que se puede deber a otros efectos más importantes como corrientes o viento. En particular, en Delta96, la presencia de corrientes producía un efecto de cizalla que tendía a alargar la mancha, con valores altos de $R_w = 3 \cdot 10^4$ y 10^7 .

Para la mayoría de los casos, la difusión longitudinal es mayor que la transversal, y sólo en los casos con corrientes de retorno se produce lo contrario.

Se dan valores por encima-izquierda de la franja, llamados hiperdifusivos, en los que hay una gran difusión con viento suave. El oleaje no es debido al viento local sino al mar de fondo. Al retirarse el viento en el mar queda bastante energía como para generar una alta difusión. Así mismo los valores en la zona baja-derecha o hipodifusivos donde hay una difusividad inferior a la esperada se explican porque los agentes forzadores empiezan a actuar y se necesita cierto tiempo para desarrollar la turbulencia y que haya una transferencia de energía de un medio a otro. El retraso entre la actuación de los distintos agentes explica estos comportamientos que se apartan de la relación lineal.

Según Zeidler (1976) se puede estimar el coeficiente de difusión K según el número de Reynolds $K_x = cR_w^{4/5}$ para oleaje en un rango de R_w altos, entre 10^3 y 10^6 , sin corrientes longitudinales ni de marea.

Los resultados de los experimentos en costa no confirman esta ley pues había otros efectos más importantes como corrientes o viento. En particular, en Delta96, la presencia de corrientes producía un efecto de cizalla que tendía a alargar la mancha, con valores altos de $R_w = 3 \cdot 10^4$ y 10^7 .

Para la mayoría de los casos, la difusión longitudinal es mayor que la transversal, y sólo en los casos con corrientes de retorno se produce lo contrario. La anisotropía viene marcada por la propia anisotropía del oleaje y por tanto del número de Reynolds como se puede ver en los experimentos de Delta 96, sin embargo en los de Recife no se nota tanto pues están dominados por la marea. Los de Zeidler en mar abierto no tienen una tendencia tan marcada.

En el puerto de Barcelona, por la condición propia de aguas abrigadas, el oleaje era bajo y la difusión estaba dominada por otros agentes. Se dieron incluso valores negativos de la difusividad transversal por elongaciones afectadas por las corrientes generadas por efectos de contorno, reflexiones o difracciones, por lo que no se incluyen en el gráfico.

8.2.3 Análisis de los resultados de dispersión en el puerto de Barcelona

En la figura 8.6 se muestra la variación medida con una precisión de 10s de la evolución de las difusividades para los distintos experimentos del puerto de Barcelona a escala decimal y logarítmica. El rango de valores de difusividad es consistente con el nivel de turbulencia ambiente $0,1-5 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$.

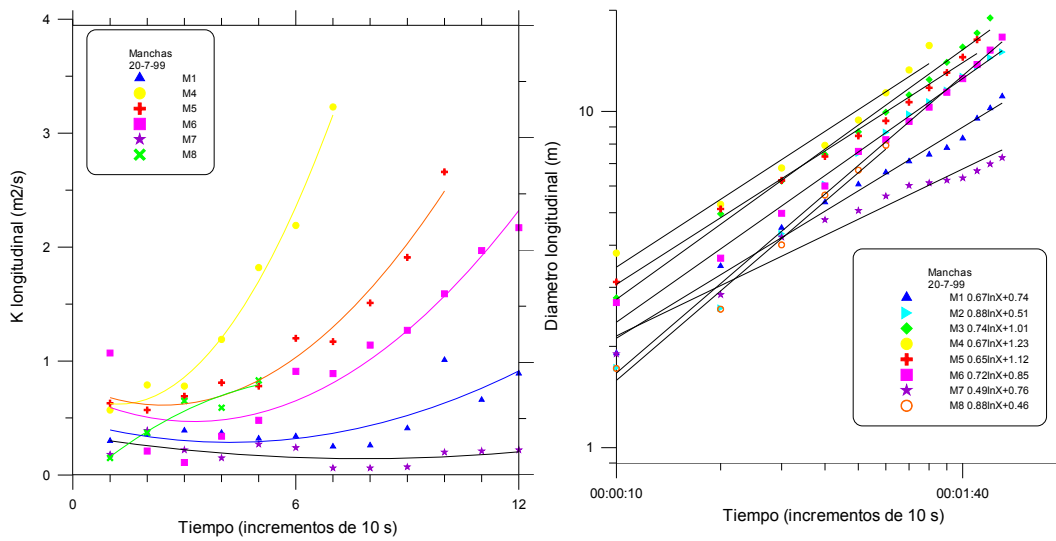


Figura 8-6. Variación de la difusividad con el tiempo. 20-7-99.

Se aprecia una consecuencia directa de la Ley de Richardson de la difusión, es decir que el coeficiente de difusión aumenta proporcionalmente al tamaño de la mancha elevada a 4/3, $K(D)=cD^{4/3}$. Esta dependencia es equivalente a que el diámetro característico aumente en el tiempo con una dependencia temporal $D = c t^{3/2}$ de manera que $K(D)=c(t^{3/2})^{4/3}=ct^2$ o más genéricamente $K=ct^{n(t)}$ según se indica en el apartado 4.4.

Los casos donde $K(t)$ disminuye con el tiempo, usualmente se deben a que la dilución de la mancha está por debajo del umbral de resolución del digitalizador. Con el tiempo, el grado de dilución hace que no sea perceptible y parece que se estabilice el diámetro, como en las manchas 8 y 9 de la figura 8.7.

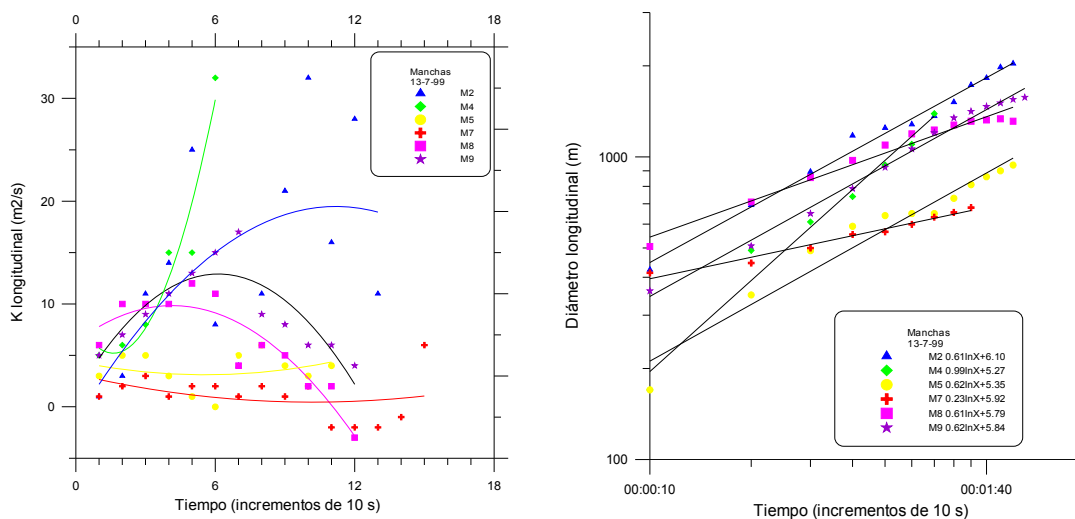


Figura 8-7. Variación de la Difusividad y el diámetro con el tiempo. 13-7-99.

Por otro lado se dan casos en que la mancha no crece en una dirección y lo hace mucho en otra, se produce un elongamiento que llega a filamentarse. Se suele producir al situarse en zonas entre remolinos, también se detectan fenómenos parecidos por difracción o reflexión. Como se puede ver en la figura 8.8, las

pendientes finales de las manchas 2 y 4 sufren alteraciones que se desvían de la ley de Richarson.

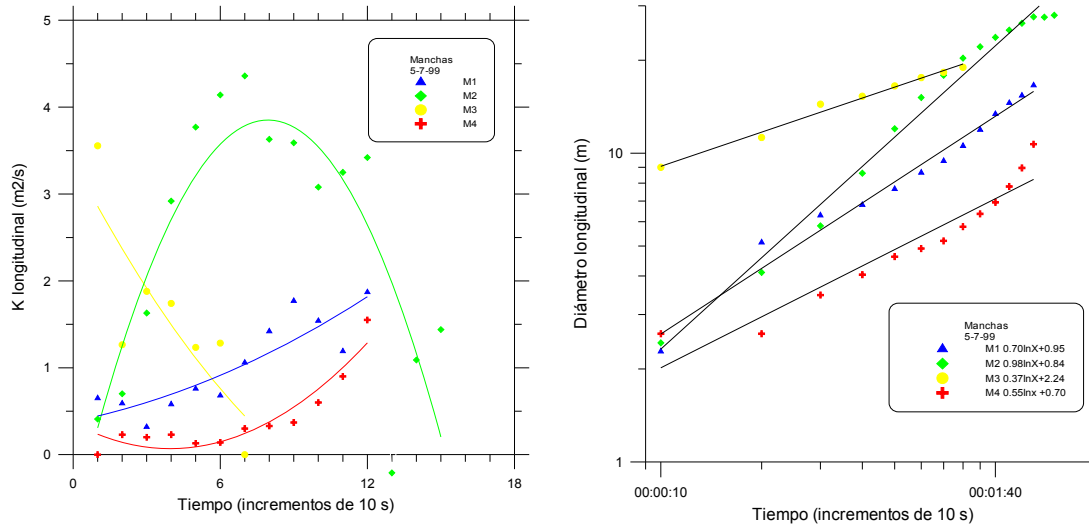


Figura 8—8. Variación de la Difusividad y el diámetro con el tiempo. 5-7-99.

INFLUENCIA DE LOS AGENTES FORZADORES

Para la influencia de los distintos agentes forzadores se hacen gráficas cruzadas de los coeficientes y lo distintos parámetros, para intentar obtener la tendencia de su respuesta. Con la influencia clara de la geometría de la bocana y del tipo de flujo local mostrado en el capítulo 7 de resultados, está claro que sólo pueden compararse directamente experimentos de la misma zona y condiciones. Se han distinguido tres zonas: aguas afuera, zona de difracción y aguas adentro (Figura 8.9). Se puede apreciar que en la dispersión hay fenómenos más relevantes que la corriente, como la cizalla y el viento.

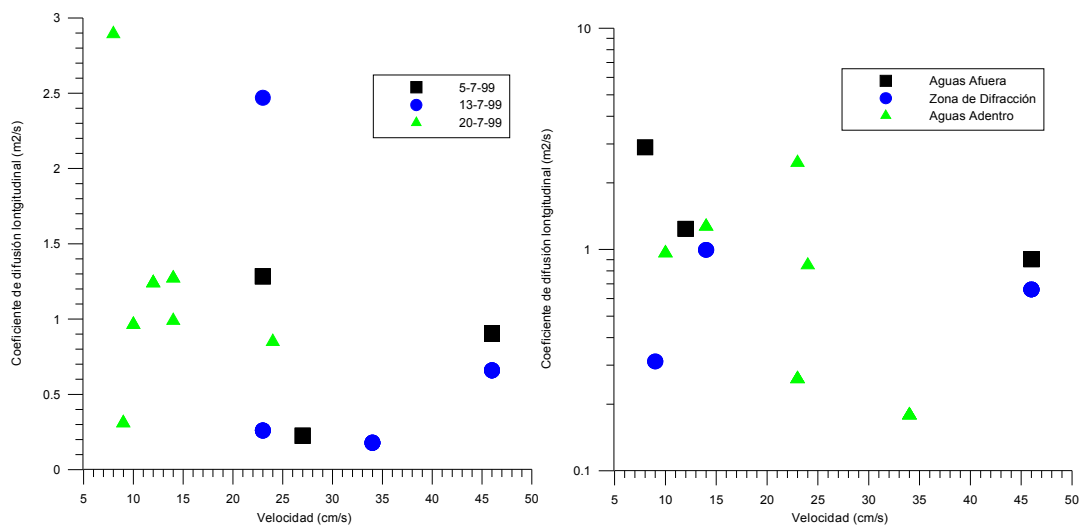


Figura 8-9. Difusión por advección por días y por zonas

Uno de principales mecanismos de mezcla es la tensión tangencial o cizalladura. Suponiendo el agua fluido newtoniano, la fricción de los contornos produce un cortante que se refleja en el gradiente de velocidades. Se puede observar que la hidrodinámica

de la zona es compleja y el campo de velocidades varía localmente por las condiciones de contorno y temporalmente según los agentes energéticos, oleaje, viento y marea (Figura 8.10).

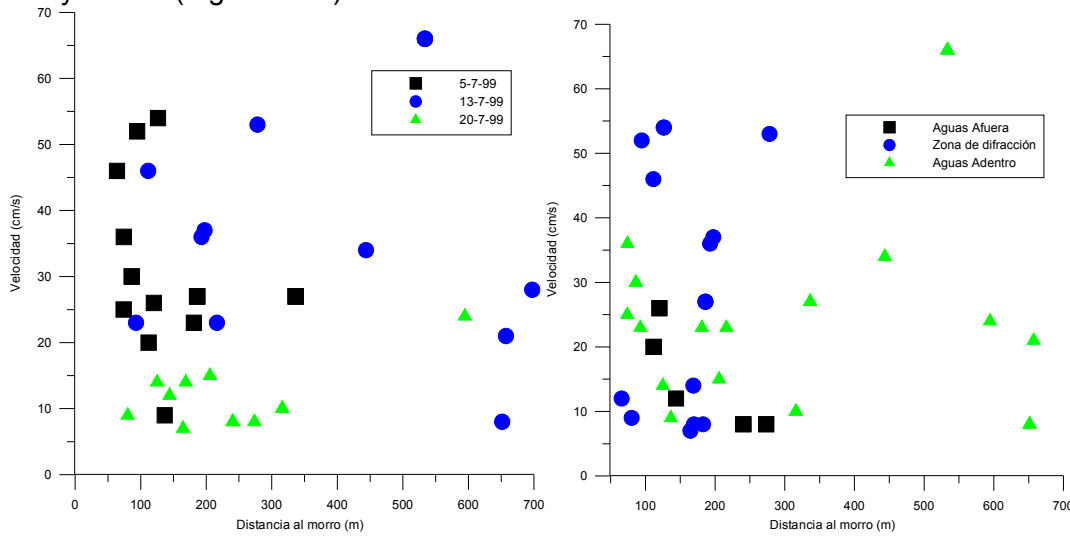


Figura 8-10. Velocidad y posición de los trazadores por días y por zonas.

En la figura 8.11 se representa la dispersión frente a la distancia al morro. Dado que los contornos son capas de tensiones de corte, este parámetro valora la posición en esta capa.

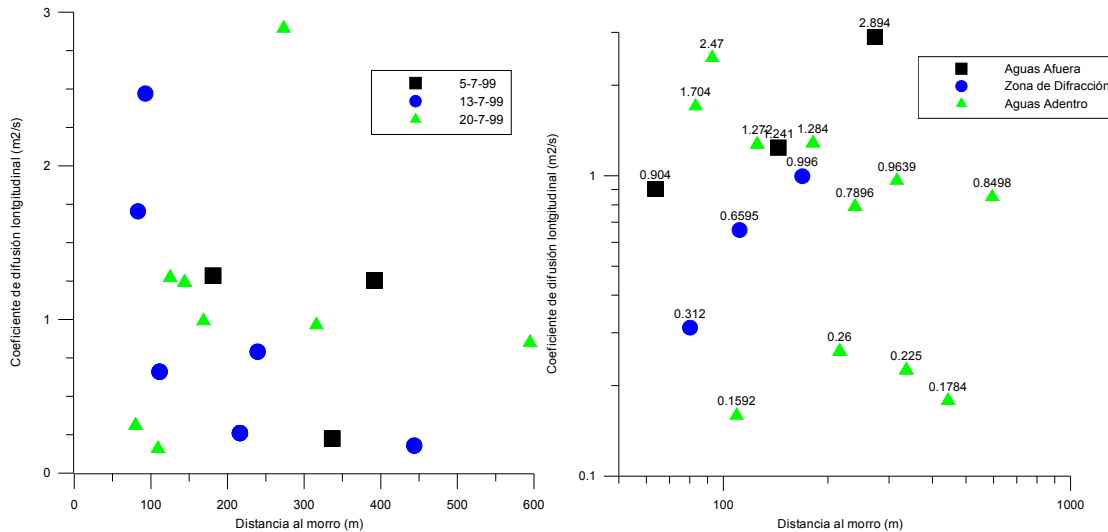


Figura 8-11. Dispersión y posición respecto el morro de los trazadores por días y zonas.

En las zonas de aguas afuera y de difracción hay pocas medidas de dispersión, una por día, de forma que no se pueden deducir tendencias. En la zona de aguas adentro se puede distinguir la influencia de los días sin viento con difusividades bajas, inferiores al valor de $1\text{m}^2/\text{s}$, de los días con viento. En estas aguas se puede apreciar una tendencia decreciente pues al separarnos del contorno la cizalla es menor.

En la figura 8.12 se representa la dispersión frente al cociente entre la velocidad y la distancia al morro. Dado que los contornos son capas de tensiones de corte este parámetro valora este rozamiento.

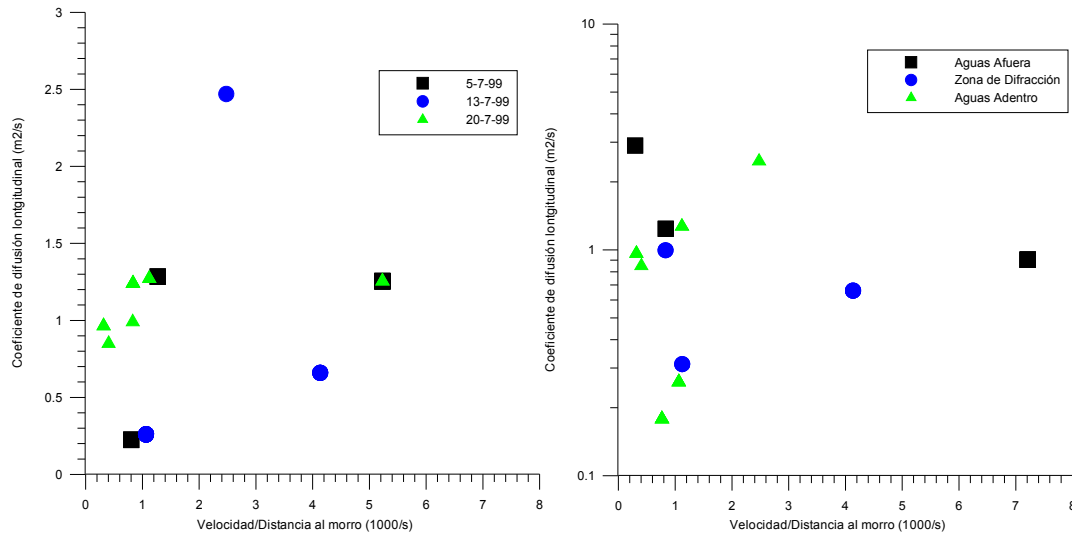


Figura 8-12. Difusión y cizalla por días y por zonas.

La cizalladura depende de la posición, de forma que se puede definir una capa límite en que la fricción domina la respuesta. A su vez depende de la velocidad media y cuanto mayor sea la corriente menor será la capa límite. Por ello, consideramos el coeficiente entre estos parámetros como una medida de cizalladura.

En la figura 8.13 se representa la difusión frente al cociente entre la velocidad superficial y la altura de ola. Este parámetro sirve para evaluar la corriente inducida por el oleaje. No se puede decir que se observe una tendencia marcada, principalmente porque las características energéticas del oleaje eran bajas, por lo que era un mecanismo forzador de baja intensidad.

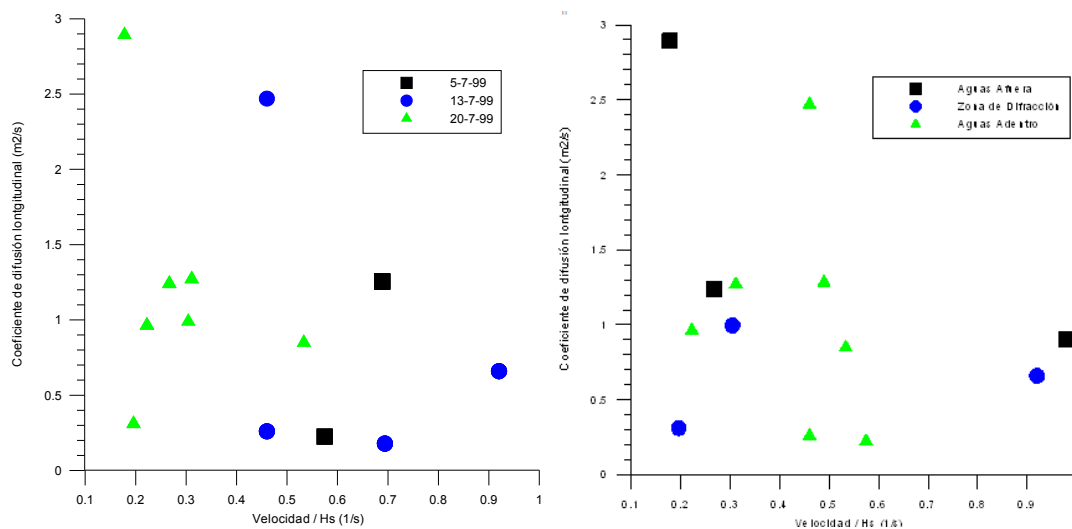


Figura 8-13. Difusión y corriente inducida por días y por zonas.

En la figura 8.14. se representa, por días, la difusión frente a la intensidad de viento de la estación meteorológica, a 10 m de altura.

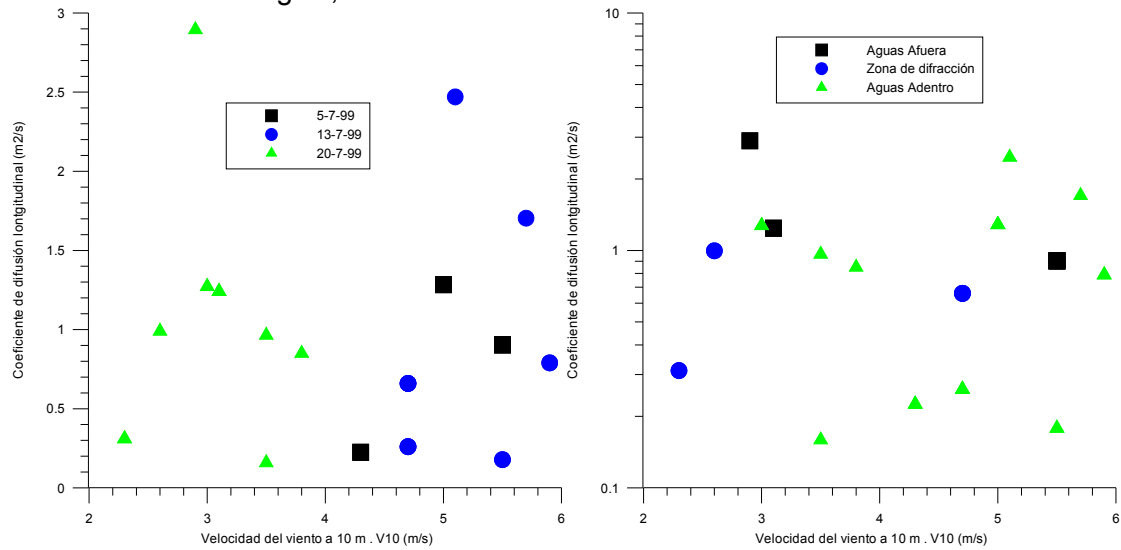


Figura 8-14. Difusión y viento por días y zonas.

Se distingue que hay un día mucho más calmado que los otros dos, el día 20-6-99. Los coeficientes de dispersión son mucho menores, salvo un punto anómalo, coincidente con la zona de difracción, donde hay una fuerte cizalla local.

En la figura 8.15 se representa la difusión frente al calado. La altura de la columna de mezcla puede limitar el diámetro del remolino para grandes escalas.

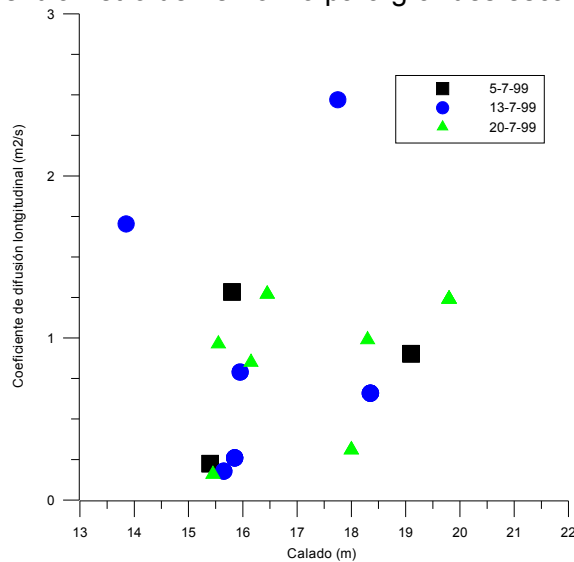


Figura 8-15. Variación de la difusividad con el calado

Se comprueba que en la zona de la bocana del puerto no existe dependencia entre el valor de la difusividad y la profundidad de la zona. Esto es de esperar, ya que no hay rotura de oleaje ni una influencia de la batimetría de la zona en el flujo, y en condiciones de verano se ha constatado que el flujo está estratificado (Marí, 1998).

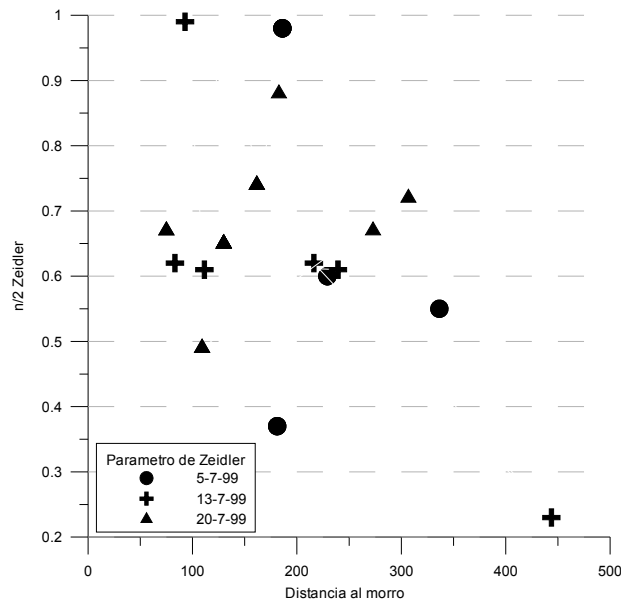


Figura 8-16. Comparación del número de Zeidler $n/2$ y la distancia al morro del dique.

La dependencia con el número de Zeidler no es muy marcada porque el número de puntos es bajo pero se marcan tendencias inversamente proporcionales a la distancia, del tipo $K = 1/D^n$.

8.2.4 Efecto del viento en la dispersión

En los experimentos realizados en el puerto de Barcelona, el comportamiento de las líneas de corriente es similar en todos los casos y se puede imponer como parametrización empírica una separatriz en la línea que siguiendo la dirección del viento en superficie, intersecta el centro de la bocana del puerto de Barcelona. En casos de viento sur-sureste (típicos de la mayoría de las medidas), estos producen una inversión local de la corriente dominante a mesoescala proveniente del Noreste (Liguro-Provenzal). En verano, solo el 13 de Julio de 1999 había una componente de la corriente Liguro – Provenzal al norte de la bocana en el exterior, produciéndose una circulación debida al viento hacia el interior del puerto. En invierno, la situación típica tuvo lugar el día 17 de Marzo del 2000, pero sólo a primera hora de la mañana, ya que a partir de las 12:15 el viento del suroeste produjo una variación de la dirección de la corriente superficial.

En las escalas de los experimentos tanto espaciales como temporales, el efecto de la Rotación terrestre es irrelevante y las características del flujo están determinadas por la batimetría y la geometría propia de la zona de difracción del muelle, que suele generar un punto de remanso y una zona de fuerte divergencia.

Los experimentos en el puerto de Barcelona muestran que la influencia de la marea o la pluma del Llobregat puede desviar la dirección de la corriente respecto del viento significativamente, llegando incluso a oponerse a él, para vientos suaves de hasta 3 m/s, como el caso del día 27.7.2000 (Figura 8.17).

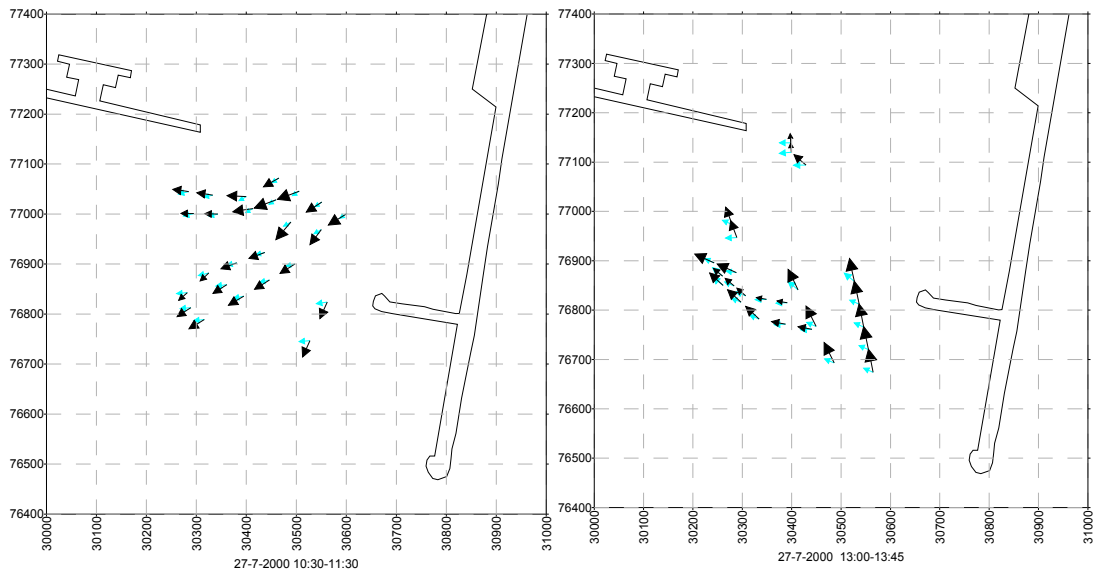


Figura 8-17. Velocidades del día 27.7.2000 a las 11:30 y las 13h.

También se puede observar el efecto venturi que produce el contorno del canal de navegación, produciéndose mayores velocidades en los estrechamientos.

La marea es de muy poca amplitud y no produce corrientes significativas en comparación con el efecto del viento y la corriente a mesoescala (Liguro –Provenzal).

Es de destacar la detección de “Seiches” o resonancia de unos 1000 s de periodo, con generación de vórtices en la parte exterior de la bocana del puerto de Barcelona.

Tanto superficialmente como en vertical, se ha visto que se desarrollan remolinos que invalidan la hipótesis de homogeneidad vertical de algunos modelos numéricos.

A partir de estos primeros resultados se ha podido correlacionar la corriente v_c con el viento v_w .

En zonas costeras rectas, sin estratificar, planas longitudinalmente, con un viento desarrollado sin obstrucciones de la ecuación del momentum Luger et al. (1999) propusieron que:

$$V_c = 2.8\% \cdot v_w \tag{Ec. 8-8}$$

Harris et al. (1973) no es tan estricto y da un rango de un 2 a un 5% de la velocidad del viento que comprende el resultado obtenido.

En una primera aproximación, no parecía haber una dependencia directa dado que se superponen muchos efectos. Para separarlos se hizo una descomposición en coordenadas como se ve en la figura 8.18. Para la coordenada X (dirección E-W) se obtuvo la siguiente correlación para 233 puntos y con un error medio cuadrático de 0.717989:

$$V_{cx} \text{ (cm/s)} = 2.306 V_{vx} \text{ (m/s)} + 0.148 \tag{Ec. 8-9}$$

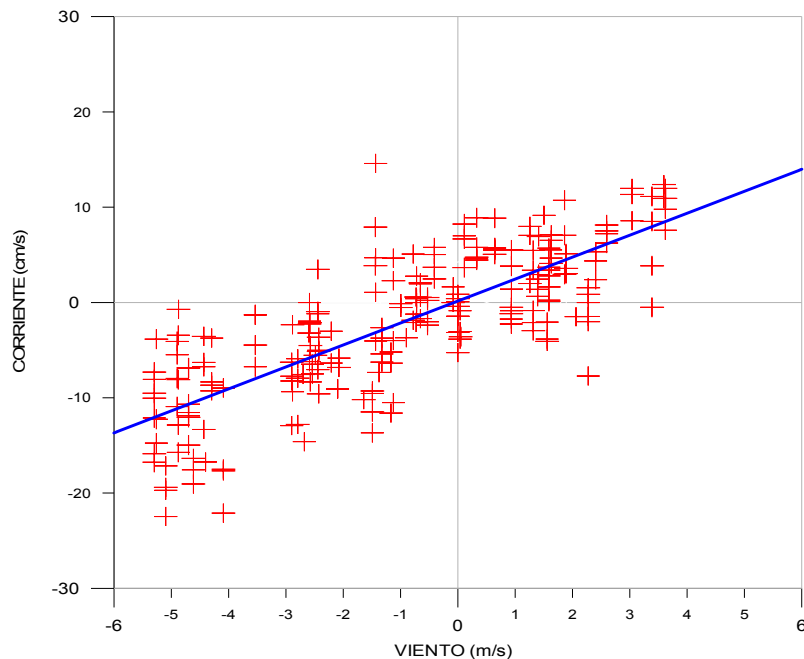


Figura 8-18. Correlación de viento y corriente en el eje X.

Hay experimentos en los que la correlación está desfasada debido al retardo entre el inicio de la acción del viento y el desarrollo de la corriente. Este desfase según diferentes autores puede ser de 2 a 12h. El hecho de que la recta no pase por el origen de coordenadas supone que el efecto de llenado-vaciado de la marea y otros agentes tienen una influencia en la hidrodinámica que no se puede obviar.

La correlación en el eje Y (dirección N-S) produjo una nube de puntos por lo que en dirección transversal al principal canal de navegación cabe destacar otros factores.

En las zonas cercanas al morro o en las zonas cercanas a muelles, donde los efectos de difracción y reflexión eran muy notables, se producían corrientes por dispersión de la energía, no debidas al viento, que en unas ocasiones aceleraban los trazadores y en otras los retenían.

En los experimentos de Recife y Barcelona se tomaron datos de perfiles de viento a distintas alturas. En la siguiente figura se muestra el ajuste del perfil de los valores medios de viento (círculos) y de las fluctuaciones (cruces). En muchos casos con un oleaje importante se empezó con perfiles logarítmicos de viento de alturas menores que la media del momentum debido a la interacción viento-olas. Extrapolando el perfil semilogarítmico a $v=0$ define una altura de rugosidad z_0 . En los experimentos de Recife los valores medidos fueron de viento suave, de unos 3 m/s en orilla y la altura de fricción de 10 cm.

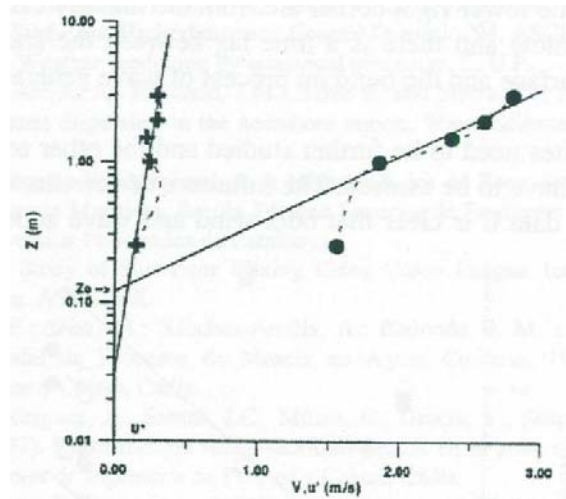


Figura 8.19 Perfil de viento en Recife. Valores medios y desviaciones. (Díez et al 2000)

La característica de la fluctuación cerca de la superficie también indica que el nivel de fricción de la velocidad puede calcularse como proporcional a la pendiente.

$$U(z) = \frac{u_*}{k} \ln(z/z_0) \quad \text{Ec 8.10}$$

Dónde k es la constante de Karman ($k=0,42$) y z_0 es la longitud de fricción, que se puede evaluar de la figura. El viento medio y la media cuadrática de las fluctuaciones del viento turbulento. Las tensiones de Reynolds se puede evaluar a partir de la velocidad de fricción como $\tau = \rho u_*^2$. Este mecanismo físico desempeña un rol más o menos importante según el lugar.

La capa de Ekman es aquella en la que las fuerzas de rozamiento no son despreciables. Esta capa forma un ángulo recto con el viento al moverse y se desvía a la derecha del viento con un ángulo menor que constituye la deriva de Ekman. De manera que la inducción de corriente por viento sufre un retraso y un ángulo relativo, que según Martínez et al (1998) es entre 13 y 38° .

El coeficiente de difusión así mismo depende de la velocidad de corriente y de su posición $K_x = v_{cx} L_x$

8.2.5 El efecto de la marea

Bezerra 2009 realizó experimentos en zonas portuarias y estuarios para evaluar el efecto de la marea. En todos los casos estudiados, la mezcla se produce en superficie con escalas variables de 1 a 15 m, advección y difusión actúan simultáneamente. El predominio de un proceso sobre otro variaba según la zona de estudio y las condiciones ambientales. En Mucuripe predominaba la advección sobre la difusión, al contrario que en Miramar y Soure. Los resultados demuestran que hay una relación directa entre velocidad y la fricción del viento en la superficie, factor predominante que produce anisotropía. El viento es más importante cuando la marea es alta. Se confirma que el efecto de la marea es mayor durante la fase de llenado y vaciado que cuando está en sus fases extremas.

Experiment	Day	Hour	Tide stage	Predominant direction of the surface current (Az)	Surface current average (m/s)	Water surface wind average (m/s)	Wave H (m) and T (seg)	KDxm (m ² /s)	KDym (m ² /s)
Comparison of data from the two Mucuripe Port experiments in Fortaleza. Neap tide.									
1	11/03/06	08:58	Low tide	218	0.01	1.2055	0.1 and 3	0.03194	0.063654
2	11/03/06	12:52	Flood	155	0.14	1.9898	0.1 and 3	0.10168	0.189563
Comparison of the Miramar data for the four experiments. Spring tide.									
1	26/10/07	08:00	Flood	-	-	1.36	0.2 and 2.5	0.0176	0.1152
2	26/10/07	10:00	Flood	235	1.08	5.98	0.8 and 2.4	2.3522	0.0976
3	26/10/07	12:30	High tide	334	0.227	1.90	0.3 and 3.3	0.0962	0.0663
4	26/10/07	16:00	Ebb tide	60	1.39	2.87	0.4 and 3.3	0.3039	0.0122
Comparative data of the four Soure experiments. Neap tide.									
1	02/11/07	13:00	Flood	306	0.47	3.51	0.2 and 0.8	0.915849	0.170156
2	02/11/07	16:40	High tide	236	0.067	4.74	-	0.156816	0.156816
3	03/11/07	07:40	Ebb tide	153	0.52	1.01	0.2 and 1.9	1.526415	0.1815
4	03/11/07	11:20	Low tide	248	0.108	3.51	0.3 and 1.4	0.089723	0.227749

Tabla 8-1. Experimentos de Brasil.

8.3 ESPECTROS DE ENERGÍA

El procesado de datos de imágenes de vídeo que se llevó a cabo, estaba bajo la suposición de que la intensidad de la luz era constante a través de las pruebas. Evidentemente, las intensidades de vídeo dependen de la calidad de la iluminación en el área de estudio y durante la prueba, los cambios de posición de sol (o si pasa una nube) también puede cambiar la iluminación.

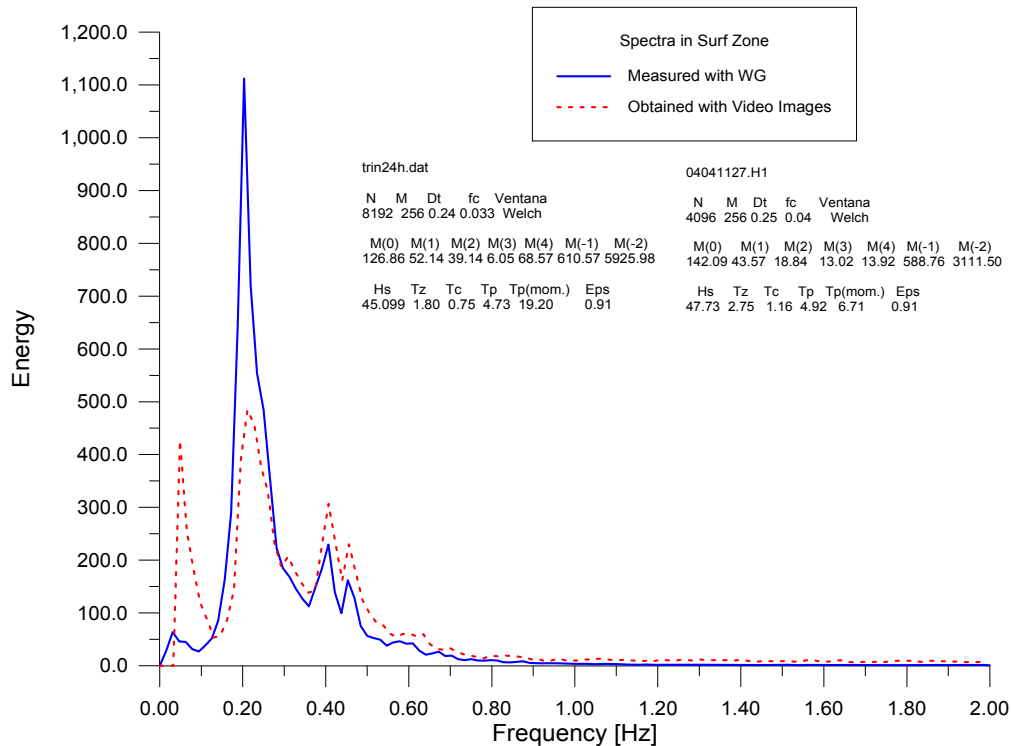


Figura 8-20. Comparación de del sensor de altura y de imágenes

Cuando se comparan los campos de onda obtenidos con el sensor de presión y los obtenidos con las imágenes de vídeo (Figura 8.20), hay una gran coincidencia en el rango de las frecuencias. Los picos de la energía sufren más distorsión debido a la rugosidad de la superficie del agua, especialmente cuando el ángulo de incidencia de la luz disminuye, es decir, cuando el análisis tiene que llevarse a cabo a un punto remoto. La vista óptima es cuando el ángulo es de cerca de 45° .

El pico principal en los espectros de las imágenes de vídeo es menor que el medido con sensor ya que, aunque ambos pueden detectar la cantidad de energía del campo de onda, las imágenes de vídeo tienen más resolución espacial que el medidor de onda (5 cm).

Sin embargo el pico de ondas de de baja frecuencia es mayor con los datos del sensor que con los de imágenes. La oscilación de onda infragravittaroria tiene una amplitud muy pequeña en comparación con su longitud de onda, cuando es menor de 5 cm, el medidor de onda es incapaz de detectarla, mientras que si lo hace el análisis de imágenes de vídeo

Hay una transferencia de energía de la frecuencia del pico principal (4,92 s) a un armónico que aparece en el doble de la frecuencia media de los picos (2,46 s).

Además, existe un pequeño pico en 2,21 s, que probablemente es debido a un oleaje local causado por un pequeño viento que soplaba en paralelo a la línea de Costa.

Una discusión más detallada de estos resultados puede verse en diez (1998), Möso (2003) y Möso et al. (2007).

Cuando se realizan los análisis espectrales, se debe tener cuidado en la interpretación en la banda de baja frecuencia. Si la resolución espectral en los análisis no es la adecuada, puede subestimar la cantidad de energía en esa región. A fin de aumentar la resolución en la región de baja frecuencia de las series de tiempo de presión, se incrementó artificialmente la frecuencia de muestreo, estimando los datos con una mayor Δt . Después de realizar un estudio detallado de la región de baja frecuencia, no se encontró nada notable. De cualquier manera, una serie de tiempo más larga podría permitir un estudio detallado de oscilaciones de baja frecuencia.

Con el análisis de imágenes algunos parámetros hidrodinámicos tales como la asimetría de espectros de energía, la dirección, la propagación de la frecuencia, etc., pueden cuantificarse fácilmente (por ejemplo, Lippman y Holman, 1992; Redondo et al. 1994 entre otros). Se pueden efectuar comparaciones entre las propiedades de onda en la zona de costa y la zona de rompientes, estableciendo la deformación de las olas durante el proceso de ruptura. La comparación de las formas iniciales y subsiguientes del espectro de ondas, es decir, el espectro en la zona de costa, de rompientes y de orilla puede verse en la figura 8.20. Los picos se producen a las mismas frecuencias pero con niveles de energía sucesivamente menores.

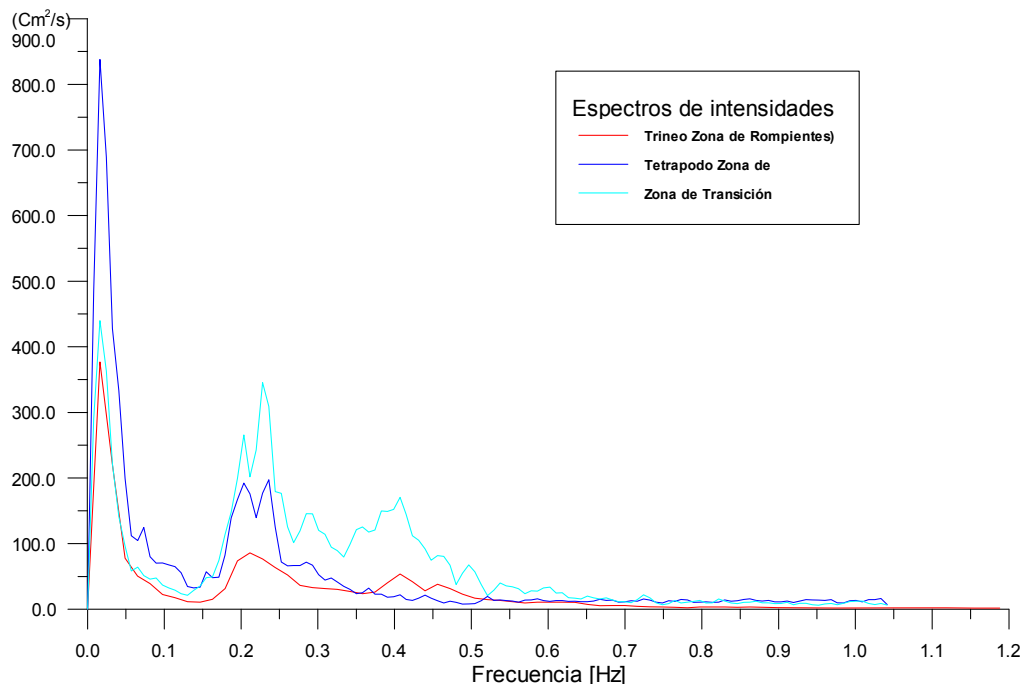


Figura 8-21. Comparación de los espectros en zona costera, de rompiente y de orilla.

La precisión en la obtención de las oscilaciones del agua en la zona de orilla es discutible. La digitalización de la imagen es muy “artesanal” y la calidad de las imágenes depende altamente del periodo elegido. Sin embargo, es una zona difícil de instrumentar, ya que el sensor de oleaje disponible trabaja con variaciones de 5 cm y el sensor de presión es difícil de colocar y calibrar.

La transformación del sensor de presión en altura de ola depende de un factor de corrección n de la Ec 7.1, con cuestiones todavía sin resolver, tales como la discontinuidad de n para la región de onda larga y el efecto de la amplitud finita. Según Hom-ma, Horikawa y Komori (1966) si se toma el término $\cosh kh$ como la unidad durante períodos de onda más cortas que 3 s, se llega a la conclusión de que para las ondas más cortas que 5 s la teoría ondulatoria de pequeña amplitud con el factor de corrección no son aplicables.

En los casos analizados en Delta 96, aunque el período es muy bajo, la comparación con los datos de laboratorio muestra un acuerdo bastante bueno entre ellos.

8.4 CIRCULACIÓN INDUCIDA POR VARIACIONES DE BATIMETRÍA

En el momento de la rotura la energía potencial se transforma en cinética. En el frente de la ola que rompe se forma una voluta, un remolino turbulento que atrapa aire en su interior. Debido a la entrada de aire en el remolino el frente brilla más y el entorno está más oscuro. Al avanzar rompiendo se disipa la energía cinética produciendo turbulencia. Por ello es un fenómeno muy visible, que se puede caracterizar mediante el análisis digital de imágenes.

Para cada test se realiza un promediado de la intensidad según un modelo on/off que asigna 1 cuando hay rotura y 0 cuando no, durante un tiempo de exposición de 10 minutos, con un snap shot (imagen instantánea) por segundo. De esta forma se estima la duración relativa de la rotura en cada punto. La suma de las longitudes de voluta L_r , con relación a la suma de las longitudes de onda del oleaje L , nos dan un coeficiente (L_r/L) para dos tipos de modelos de disipación: uno paramétrico y otro probabilístico.

La **aproximación paramétrica** parte de un área de rotura en función de la energía de voluta según la forma. Para deducirse el área de voluta A de la densidad de energía de voluta $E_r = 1/2 \rho c^2 A/L$ implícitamente se debe conocer su distribución. Por otro lado, la E_r está relacionada directamente con la disipación de la energía del oleaje organizado.

$$\frac{L_r}{L} \approx \frac{A/H_r}{L} = \frac{2E_r}{\rho c^2 H_r} \quad \text{Ec. 8-11}$$

Para despejar la incógnita de la altura de ola de rotura H_r de la expresión se debe modelar el área de voluta A . Para ello se debe adoptar alguna hipótesis:

- Asumir una forma de voluta constante $H_r/L_r = k$ (Longuet-Higgins y Turner 1974), es decir la H_r crece proporcionalmente a la distancia entre crestas, y como $L = c T$ se obtiene:

$$\frac{L_r}{L} = \sqrt{\frac{2E_r}{k\rho c^2 L}} = k' \sqrt{E_r/c^3} \quad \text{Ec. 8-12}$$

- Con H_r constante domina el proceso de entrada de aire (Longuet-Higgins 1974). Esta entrada sólo se produce si la turbulencia de la superficie libre tiene suficiente energía para vencer la tensión superficial, de forma que los

remolinos se proyectan hacia fuera atrapando burbujas de aire. Las inestabilidades locales se relacionan con efectos de capilaridad independientemente de la altura de ola y escala de profundidad. Como la tensión superficial no varía a lo largo de la superficie libre, se forma una capa de espuma de grosor constante H_r . Por tanto, el parámetro físico para la correlación de L_r/L es E_r/c^2 .

En las imágenes, si la intensidad de un píxel I es distinta de cero indica que en ese punto se ha producido rotura o que se ha propagado hasta alcanzar este punto. La voluta es visible tan sólo la fracción de tiempo igual al porcentaje de superficie de ola cubierta por la rotura, es decir L_r/L . La probabilidad de observar rotura ($I > 0$) en el punto x de una ola H es la suma de las probabilidades de que rompa en el punto x o un Δx antes:

$$I(x, H) = \sum_{x_i=x-\Delta x}^{x_i=x} P(H(x_i) = H_m(x_i)) P(L_p > (x - x_i)) \frac{L_r}{L} \quad \text{Ec. 8-13}$$

$P(H(x_i))$ es la probabilidad de que en el punto x_i se dé una altura de ola H ,
 L_p es la longitud que persiste tras la rotura,
 H_m es la máxima altura de ola local limitada por la profundidad.

El modelo probabilístico necesita mucha información:

- La forma de la rotura para estimar el porcentaje cubierto por espuma, sus variaciones espaciales y temporales.
- La longitud de persistencia de la rotura. Lippman y Thornton (1994) desarrollaron una expresión en función de la asimetría del oleaje y la energía E_r a distintos calados, normalizada por la longitud de onda L . Sin embargo no es aplicable, pues fue deducida para un caso muy simplificado.
- Un modelo on/off cuya intensidad resultante dependa de la altura de rotura, tipo de rotura y otros parámetros. Esto supone complicadas funciones y la expresión L_r/L .

Vistas las consideraciones anteriores, en el estudio se adoptó la aproximación paramétrica con una H_r constante en toda la zona de surf y por tanto se tomó E_r/c^2 como parámetro físico.

Para transformar la intensidad en el parámetro físico E_r/c^2 se deben realizar cuatro operaciones de “escalado”:

- Una eliminación de la tendencia. A menudo se produce un gradiente de intensidad $\psi_I(\mathbf{x})$ sobre toda la pantalla debido al ángulo de incidencia de la luz y a condiciones atmosféricas, de forma que se desvía el perfil de intensidad. En general, se adopta una corrección lineal basada en una línea de referencia en aguas profundas.
- Una corrección base. Fuera de la zona de surf los valores de intensidad después de eliminar la tendencia son distintos de cero debido a la presencia de una luz de fondo; para eliminarlo se ha de restar la intensidad de base o fondo I_{base} , el mínimo.
- Escalado de las intensidades. La intensidad base tiene valores entre 0 y 1 y debe multiplicarse por un factor de escala SF, de forma que el área bajo la curva sea la misma que bajo la de $E_r/c^2 \approx \rho H_s^3/8^2$. En el modelo se estima como $H_{\text{sig}}/H_{\text{máx}}$ en el contorno, el fondo, pues E_r/c^2 es una variable adimensional.

- Un ajuste vertical del perfil de intensidad tal que la intensidad en el contorno I_b , de aguas profundas, se ajuste a $(E_r/c^2)_b$. Como esto descompensa el área bajo la curva, debe variarse el **SF** iterando hasta que coincidan.

Estas cuatro operaciones se pueden sintetizar en la siguiente transformación:

$$F[I(x)] = SF[I(x) - \psi_l(x) - I_{base}] \quad F[I_b] = (E_r/c^2)_b. \quad \text{Ec. 8-14}$$

El modelo de propagación UNIBEST-TC simula la distribución espacial de distintas variables hidrodinámicas. Está basado en las ecuaciones de Battjes (1975) y de Battjes y Jansen (1978). Necesita ser alimentado con una batimetría, nivel de marea, oleaje en aguas profundas (H_{rms} , T_s , dirección). Da la distribución especial a distintos tiempos del oleaje, corrientes y características del transporte de sedimentos como la altura de ola H_{rms} , celeridad de fase c , fracción de olas rotas Q_{sl} , disipación del oleaje D_w , disipación por rotura D_{iss} , energía de rotura E_r , E_r/c , E_r/c^2 .

El modelo MONIMORPH comprende las ecuaciones inversas de UNIBEST-TC. Éste se basa en la distribución transversal de E_r/c^2 derivada del escalado de las intensidades para determinar la correspondiente elevación del fondo.

Por otro lado, promediando la zona de rotura se pueden identificar irregularidades en la batimetría. En Delta 96 se identificó una rotura que parecía ser la causa o efecto de la existencia de la corriente de retorno constatada por la trayectoria que describían las boyas (Figuras 8.22 y 8.23).

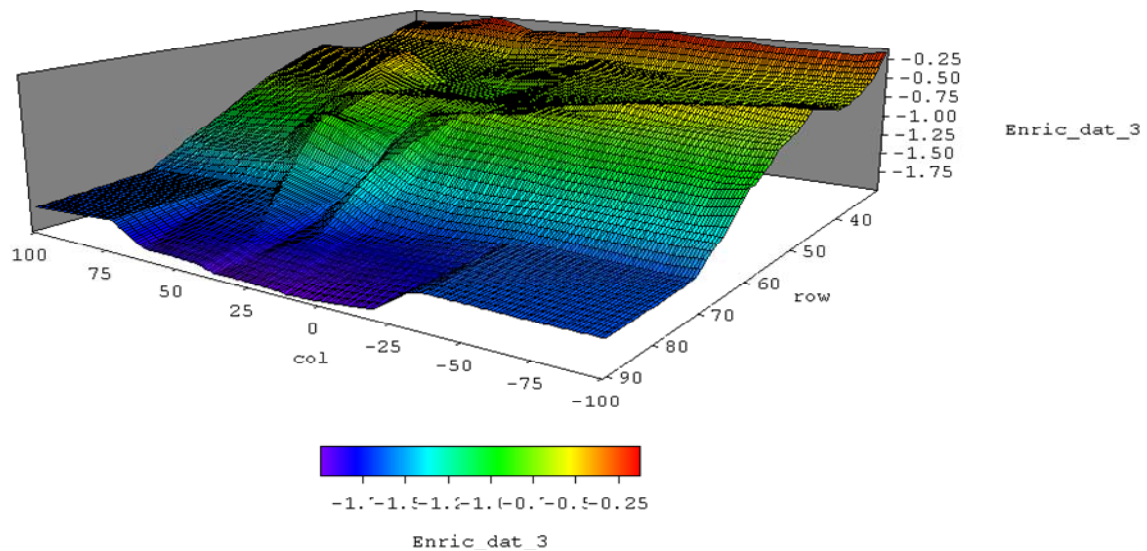


Figura 8-22. Batimetría 3D.

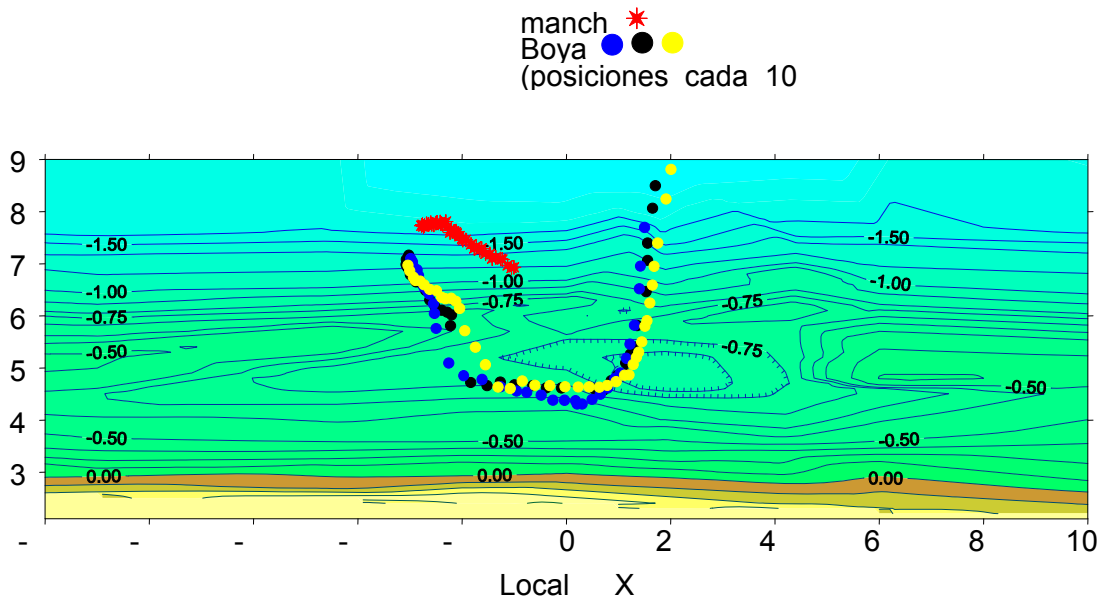


Figura 8-23. Batimetría bidimensional con la trayectoria de las boyas.

Para comprobar que la morfología era la desencadenante de la corriente se realizó una simulación numérica con los programas PROPS y CIRCO. Los resultados obtenidos se pueden ver en las figuras 8.24 y 8.25 (Sierra et al. 1998).

La existencia de una barra de arena provoca un peralte del oleaje por setup que no se da donde la barra aparece rota. Este gradiente de altura de ola induce corrientes necesariamente por conservación de flujo.

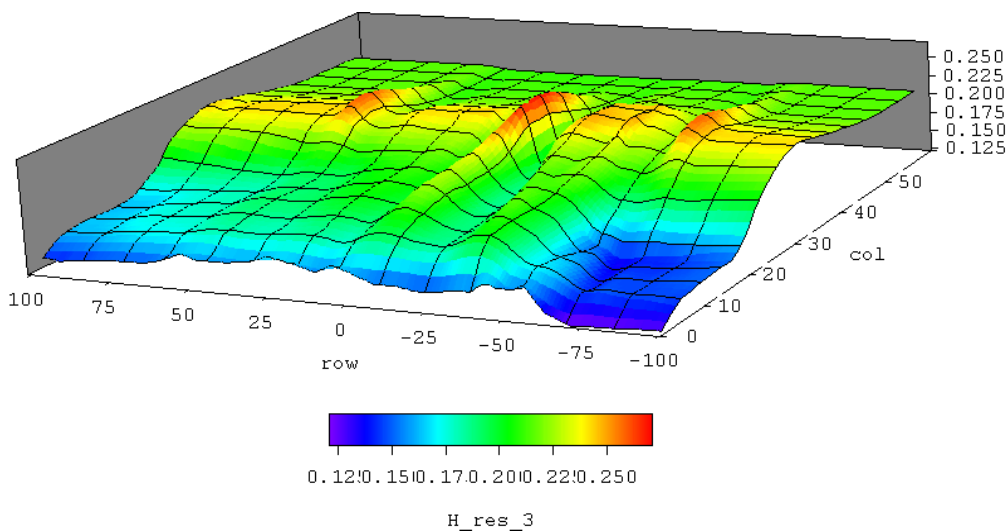


Figura 8-24 Simulación de la altura de ola máxima en cada punto.

En la simulación de corrientes se observan celdas del mismo tipo de la que reflejan las boyas, inclusive se pueden seguir éstas con los vectores de velocidad, aunque este resultado debe tomarse prudentemente.

Dado que la orilla presentaba una morfología rítmica, cabe pensar que las celdas se repetían secuencialmente a lo largo de la playa, tal y como reproduce el modelo, dando lugar a la formación de beach cups.

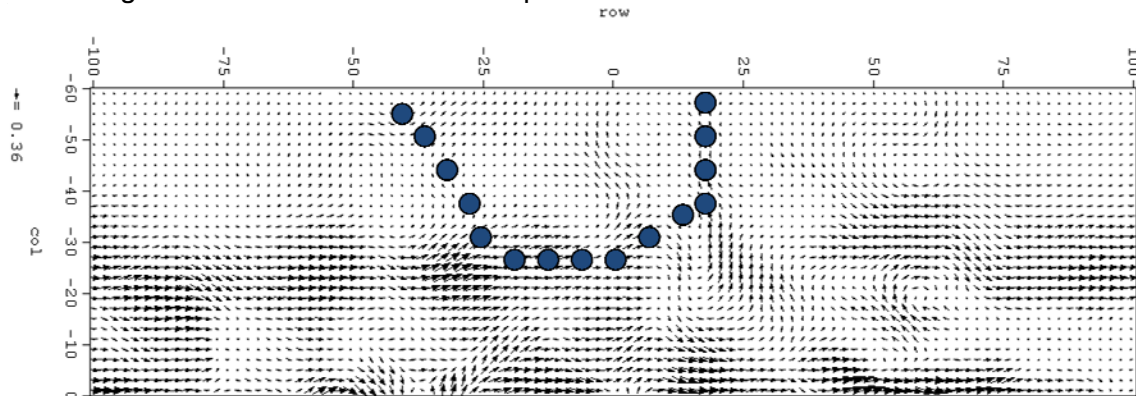


Figura 8-25. Simulación de la velocidad horizontal verticalmente integrada.

8.5 DETECCIÓN DE CONTAMINACIÓN

La contaminación se puede clasificar en dos grupos según los efectos producidos:

Vertidos que pueden matar directamente organismos marinos:

- Recubrimiento y asfixia de crustáceos.
- Envenenamiento por contacto directo o ingestión (plantas y pájaros).
- Exposición a compuestos de petróleo solubles en agua (peces e invertebrados).
- Destrucción de las formas juveniles más sensibles (larvas y huevos).
- Alteraciones corporales por insolación en animales de sangre caliente (pájaros buceadores).

Efectos indirectos perjudiciales:

- Destrucción de las fuentes de alimentación.
- Efectos sinérgicos que reducen la resistencia o producen estrés.
- Incorporación de sustancias cancerosas y mutagénicas.
- Reducción de la eficacia reproductiva.
- Alteración de órganos esenciales para la supervivencia, reproducción o alimentación.

Tal y como ocurre en medicina, la mejor forma de curar es prevenir. Existen medidas preventivas para disminuir el riesgo de vertido debido a accidentes de petroleros, operaciones de limpieza, carga y descarga u otras causas. Sin embargo, a menudo se enfrentan a un coste adicional que enfrentan los intereses ecológicos y comerciales.

De las técnicas para eliminar las manchas de petróleo en el mar, se ha demostrado que el uso de dispersantes produce daños tan perjudiciales como el propio vertido. Por otro lado, el uso de bacterias puede tener efectos secundarios no estudiados, especialmente en mares cálidos. En consecuencia, los métodos de extracción mecánica son los más usados.

Por lo tanto, hay que intentar conocer cada vez más todos los factores que influyen en el vertido y los procesos que sufre dicho vertido para mejorar su eliminación y disminuir los efectos que pueda producir. El grado del impacto depende principalmente de los siguientes parámetros:

- La dosis de petróleo vertida al medio.
- La naturaleza física y química del vertido.
- La localización del derrame.
- La época del año en que se produce (estado vegetativo de los organismos).
- Las condiciones ambientales predominantes (agitación y corriente).
- Las técnicas de limpieza empleadas.

Por otra parte, se han desarrollado procedimientos de control para hacer un seguimiento preciso de manchas de hidrocarburo mediante un satélite que proporciona imágenes por radar, o bien gracias a imágenes de infrarrojos. Esto permite conocer la posición de la mancha en cada instante e incluso en situaciones meteorológicamente adversas o durante la noche, lo cual es muy importante para poder coordinar adecuadamente las operaciones de actuación a realizar.

Es sorprendente que, de las imágenes SAR analizadas (Figura 8.26), el 72.6% detectasen vertidos de petróleo de tamaños entre 1 y 100 Km².

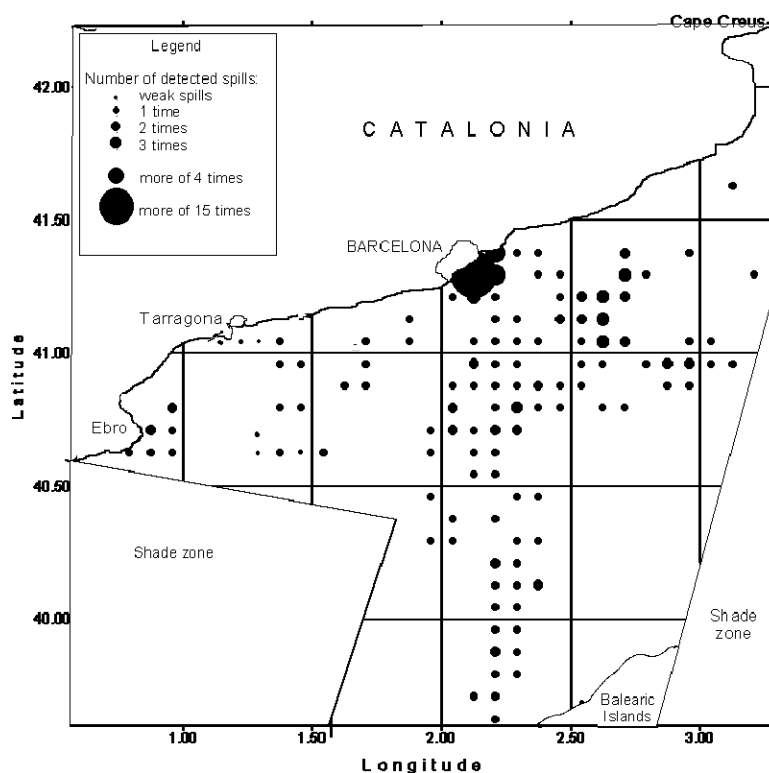


Figura 8-26. Vertidos en imágenes S.A.R.

En las imágenes SAR se confirma que es mucho mayor la cantidad de petróleo vertida en los mares litorales Europeos y detectada durante los dos años del programa europeo CLEAN SEAS que la parte proporcional estadística debida a todos los accidentes en los últimos 30 años, incluyendo el del Erika en 1999.

Se cumple la Ley de Zipf (Zipt 1949), que indica que la frecuencia de la ocurrencia de algunos eventos asociados con las actividades humanas es mucho mayor a escala pequeña que a gran escala, según una ley de dependencia hiperbólica en la escala logarítmica – lineal como puede verse en la figura 3.11 obtenida por Redondo y Platonov (2009).

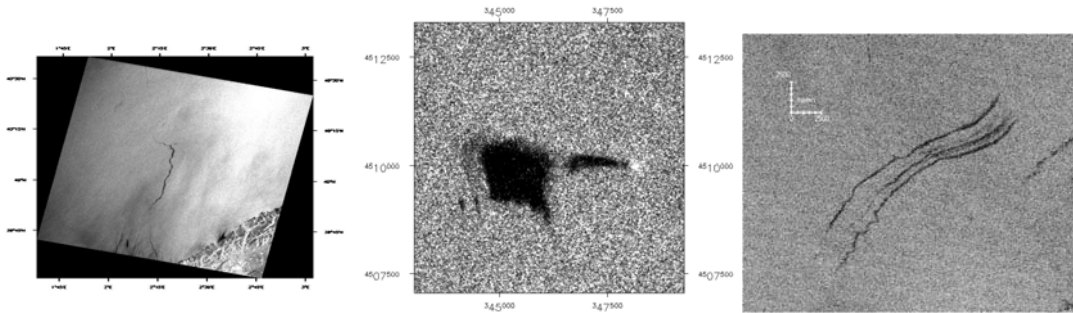


Figura 8-27 Ejemplos de manchas detectadas.

Al comparar el índice de contaminación por hidrocarburos de 709 imágenes SAR en aguas europeas con las 5029 imágenes del ERS-1 y 2 entre las imágenes del Océano Índico y Pacífico analizados por Lu (2003), parece que las aguas europeas son menos contaminadas pero con mayor frecuencia. Sin embargo hay que tener en cuenta el nivel de oleaje y viento local para la detección de manchas. Por ejemplo, los fuertes vientos (media 5,7 m/s con un fuerte sesgo) y las olas en la zona del Mar del Norte hacen más difícil su detección.

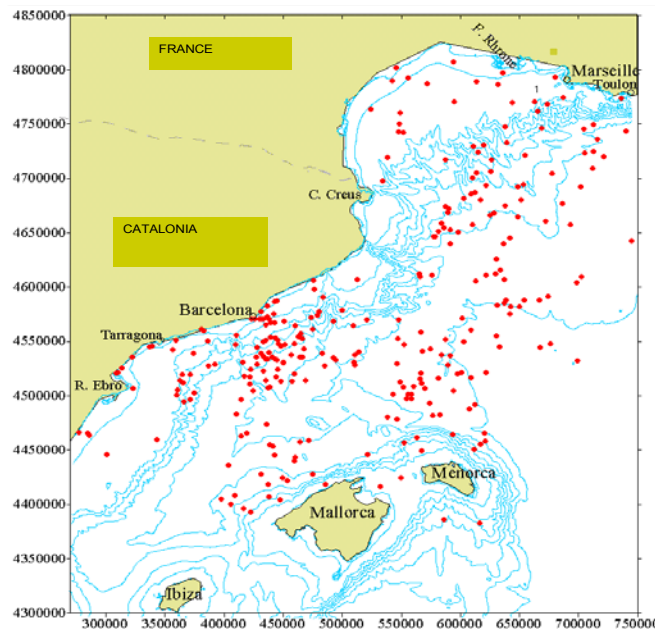


Figura 8-28. Detección de vertidos en el Mediterraneo Occidental

Por otro lado, los derrames de petróleo detectados por satélite que corresponden a pequeños accidentes en alta mar, la escorrentía y las aguas de lavado de los tanques de los buques y de lastre en alta mar son tan importantes como los mayores desastres ambientales.

La persistencia y grado de contaminación de los hidrocarburos suponen un serio peligro para el ecosistema marino y cuantiosas pérdidas si llegan a la costa, aunque la presencia continua de bajas concentraciones de hidrocarburos puede tener un efecto acumulativo. La divulgación de esta técnica de detección de vertidos de hidrocarburos mediante análisis de imágenes SAR, junto con alguna medida ejemplar serviría de medida coercitiva.

La difusividad turbulenta superficial es anisotrópica, pero se puede estimar de forma global a partir de la variación del área del orden de $50 - 300 \text{ m}^2/\text{s}$, para derrames de tamaño de unas decenas de kilómetros.

Se han analizado los resultados por las fechas del año y se puede ver que hay un cierto comportamiento estacional, como se puede ver en la figura 8.29.

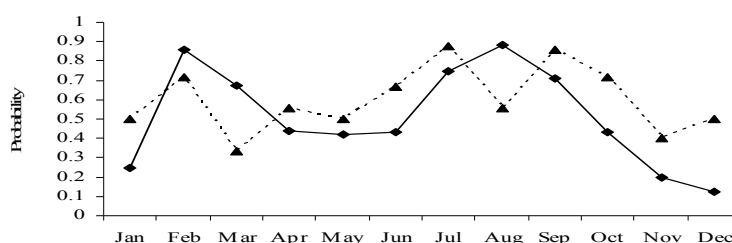


Figura 8-29. Comportamiento estacional del número de vertidos.

La eficacia de mezcla es un factor importante en la determinación de la tasas de mezcla de muchos flujos. Para obtener mejores estimaciones con las circunstancias reales es importante tener en cuenta la eficacia en la mezcla al modelar numéricamente y predecir con exactitud el complejo comportamiento de los flujos con gradientes de densidad, como muchos de los flujos industriales y ambientales (por ejemplo, los gases en atmósfera densa, la mezcla en el interior del océano, los efectos de la rotación, dispersión, etc.).

Los resultados de la campaña Delta 93 fueron utilizados para validar el análisis. Los resultados de tres días con las condiciones de mar muy diferentes. Se compararon medidas de corriente longitudinal y de dispersión. También se analizaron los resultados del Laboratorio de Ciencias do Mar de la Universidade Federal do Ceará.

La comparación entre las características lagrangianas (referencia móvil) y Eulerianas (referencias absolutas o coordenadas fijas) de los flujos de dispersión turbulenta son importantes (Redondo y Castilla 1994) cuando se utilizan boyas de seguimiento para estimar la difusión, ver Castilla y Babiano (2006).

8.6 CARACTERIZACIÓN DE LA VORTICIDAD EN EL MEDITERRANEO NOROCCIDENTAL

La compleja dinámica regional de las aguas superficiales también se manifiesta en las imágenes SAR por medio de múltiples estructuras superficiales de origen natural que indican la presencia de vórtices y otras estructuras dinámicas en la superficie del mar.

El área con mayor concentración de estructuras dinámicas asociadas a los vórtices y a la cizalladura horizontal del agua, se encuentra cerca del cañón submarino de Blanes. Otras áreas de relativamente alta frecuencia de detección de estructuras dinámicas están situadas cerca de las Islas Baleares y en el litoral de Tarragona.

La orientación espacial de las elipses ajustadas a los vórtices fue determinada mediante el ángulo entre la dirección Norte y la dirección del eje mayor.

Debido a su distribución binormal (figura 8.27), se considera que existen dos tipos de mecanismos-orientadores de los vórtices:

- Dinámico, debido a la influencia de la corriente Liguro-Provenzal (cerca de 50% de vórtices detectados tienen el ángulo de la orientación entre 25° y 75°).
- Batimétrico, por causa de la influencia de los cañones submarinos orientados perpendicularmente a la línea de la costa (en 25% de los casos los vórtices detectados tienen ángulos acimutales entre 125° y 145°).

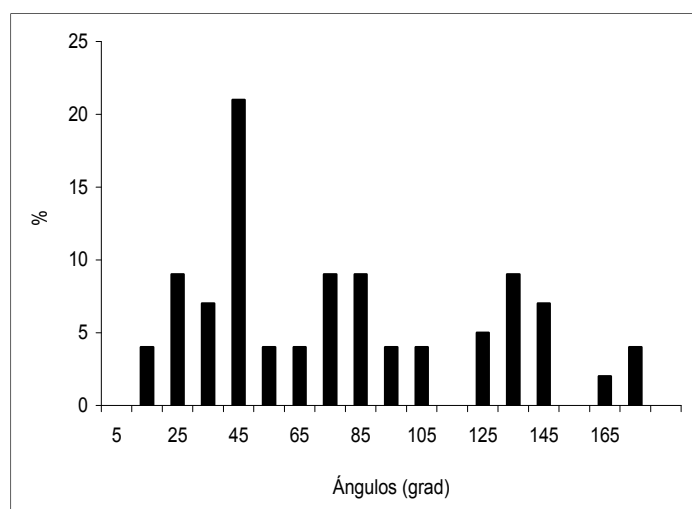


Figura 8-27 Histograma normalizado de los vórtices en función del ángulo de la dirección principal respecto al norte en el sentido de las agujas del reloj. Redondo y P. 2009

En el Mediterráneo Noroccidental han sido detectados in situ remolinos y filamentos espirales por observación remota mediante diferentes proyectos de investigación. En Tintorè et al. (1990) mediante imágenes de satélite en infrarrojo muestran los resultados de la detección y medidas in situ de los remolinos anticiclónicos de aguas frías y poco saladas en el límite de la plataforma continental cerca de Barcelona. Se calcula mediante el método dinámico la estimación de la velocidad de la corriente geostrofica (respecto a una profundidad de 200 m), la velocidad característica de la rotación anticiclónica de un vórtice típico (~20 cm/s). También se monitoriza durante

cuatro días el desplazamiento de un frente de aguas frías y se calcula la velocidad media de su deriva a lo largo de la costa de Barcelona que alcanza unos 25 cm/s.

Font et al. (1993), indicaron la existencia de un remolino en mesoescala al Sur del Cap de Creus y un dipolo entre las Islas Mallorca y Menorca por las trayectorias de las boyas en deriva.

Rojas et al. (1995), en el proyecto MECA 93, mediante imágenes del SAR detectaron vórtices ciclónicos de 5 km de diámetro al sudoeste de los cañones submarinos de Blanes y Palamós y de 20 km de diámetro al norte del Golfo de Roses. También las formas circulares de las trayectorias de las boyas en deriva muestran la existencia de un gran vórtice de carácter anticiclónico cerca de la Costa Brava. Las aguas relativamente frías y de baja salinidad procedentes del Golfo de León crean campos de gradientes horizontales de densidad y de flujos locales detectados en la plataforma continental. La interacción entre estos flujos y la compleja topografía del fondo (los cañones submarinos) tiene un papel principal en la formación de las corrientes costeras y los remolinos.

Tintoré et al. (1990), indican no obstante, la circulación de los vórtices desde la plataforma continental hacia alta mar está asociada con el transporte de material en suspensión (clorofila y especies de plancton).

Allen (1988) demostró teórica y experimentalmente la deflexión hacia mar adentro de vórtices baroclinos costeros, al encontrar una diferencia de profundidad, y en Chen y Allen (1996) se detalla la influencia de las características del cañón submarino en el flujo transversal a la costa.

En el caso del cañón de Blanes, el modelo numérico de Arduin et al. (1999) también muestra la deflexión mar adentro de los vórtices baroclinos. También se han detectado vórtices elípticos parecidos en las corrientes marinas superficiales. Sus fuertes dependencias de batimetría local (por ejemplo en la zona del cañón submarino del Foix que está situado al Sudoeste de Barcelona), fueron detectadas en la campaña MEGA 93 (Rojas et al., 1995), y en modelos numéricos de la zona (Canals et al., 1997). La extensión de la mayoría de los remolinos (78 %) es menor de 100 km².

En los remolinos detectados cerca de Barcelona (Platonov 2001), el tamaño máximo coincide notablemente con el límite impuesto por el radio de deformación de Rossby Rd con una estratificación termoclina (h), entre 10-320 km:

Radio de Rossby	$Rd = (N/f)h$	Ec. 8-15
------------------------	---------------	-----------------

N frecuencia de Brunt-Vaisalla	$N^2 = \frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z}$	Ec. 8-16
---------------------------------------	---	-----------------

f es la fuerza de Coriolis	$f = 2\Omega \sin \vartheta$,	Ec. 8-17
-----------------------------------	--------------------------------	-----------------

Ω es la velocidad de rotación de la tierra

ϑ es la latitud

Se considera que los vórtices grandes no son estables por dos razones:

- La estabilidad de los vórtices depende del radio de deformación de Rossby, determinado en función de los términos de empuje mediante la frecuencia de Brunt-Väisälä N y de la frecuencia inercial, dada por el parámetro de Coriolis. Si el radio del vórtice es mayor que el valor calculado del Rd, éste es inestable y se rompe en otros menores.

- La vorticidad local a pequeña escala (< 5 km) generada por la batimetría compleja de la zona así como la fricción costera, parece desestabilizar a los grandes vórtices, que son advectados por la corriente Liguro-Provenzal.

Las medidas en el Mediterraneo son hasta dos órdenes de magnitud inferiores al Pacífico, debido a que se pueden desarrollar con remolinos mayores, según el radio de Rossby, y por tanto la difusión es mucho mayor.

Es posible generar mapas de difusividades temporales y espaciales a partir de la información obtenida por satélite como puede verse en la figura 8.28. (Jolly et al 2001). De forma dimensional solo hay que buscar una escala local relevante de velocidad y una de longitud dependientes de la posición y el tiempo $L(x,y,t)$ y $V(x,y,t)$ para que al multiplicarlas resulte un coeficiente de difusión $K = L \cdot V$. Una posibilidad mas sencilla es usar la medida de una escala integral calculada a partir de las correlaciones espaciales de imágenes de satélite, esta correlacion puede efectuarse con imágenes de visible, infrarojo, clorofila, etc. Con la hipótesis de que las escalas espaciales de cambio de la velocidad seran similares a las de cambio del escalar (iluminación, temperatura o color) detectadas. En el caso de la figura 8-28 se utilizaron escalas integrales de imágenes SAR (o de rugosidad de la superficie del oceano) que debido a las inestabilidades de Langmuir permiten detectar muy bien la distribución de remolinos superficiales Redondo y Platonov (2001), Matulka (2010), la escala temporal usada es sencillamente la inversa del parametro de Coriolis.

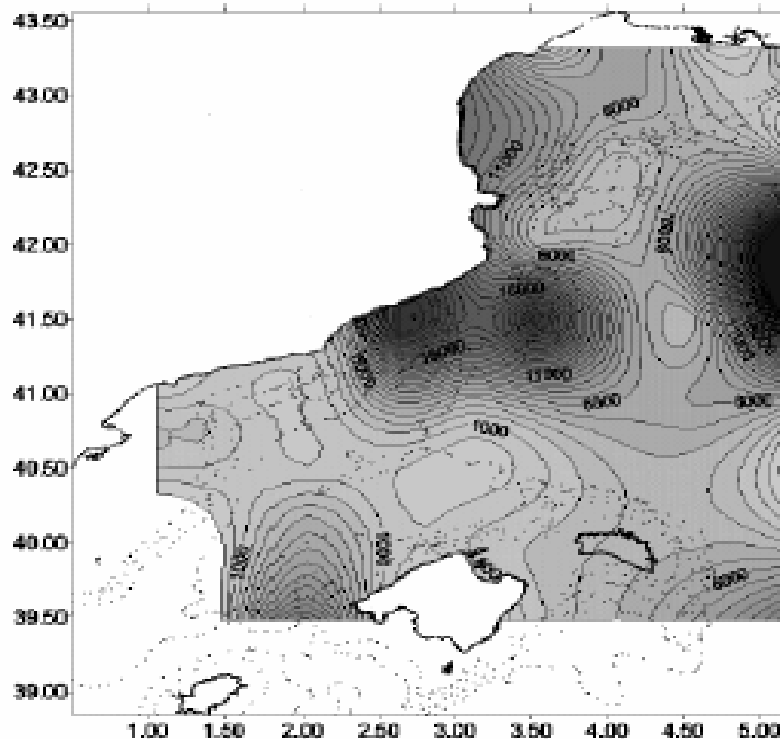


Figura 8-28 . Mapa 2D de difusión turbulenta obtenido de estimaciones locales de la escala integral de imágenes SAR

8.7 DEPENDENCIA DE LA INTERMITENCIA Y FRACTALIDAD: LEY DE RICHARDSON GENERALIZADA.

En el proceso 3D de remolinos turbulentos, tipo cascada Kolmogorov, permite la aparición de una intermitencia, que esta distribuida de forma fractal entre las diversas escalas correspondientes al tamaño de los diversos remolinos, según (Jou 1997), Redondo et al.(2008) y Frish(1995) se puede asumir la localidad de los procesos de transferencia local, esto es:

- Las propiedades de la jerarquía de remolinos a una escala determinada sólo dependen de la disipación local de ese tamaño ε_L , a esa escala L
- Existe un "rango de inercia" intermedio de los remolinos o $L \gg L_\nu \gg L_\eta$ donde la viscosidad no juega ningún papel. En este rango, todas las propiedades deben ser determinados por ε (al menos en un rango de escalas, pero manteniendo una homogeneidad menos restrictivas y una visión local respecto a la intermitencia).
- En la practica tal como esta descrito en Mahjoub(2001), Mahjoub et al (1998) la no-homogeneidad puede confundirse con la intermitencia, y la variabilidad espacial y temporal pueden entremezclarse.

Se puede describir la velocidad característica $v(L)$ para remolinos de tamaño L depende de L . Puesto que las dimensiones de ε son de velocidad/tiempo:

$$v(L) \approx (\varepsilon L)^{1/3} \quad \text{Ec. 8-18}$$

Y por lo tanto la distribución fraccionada de la energía por unidad de masa y la longitud será.

$$E(L)(dL/L) \approx v(L)^2(dL/L) \approx (\varepsilon L)^{2/3}(dL/L) \approx \varepsilon^{2/3} L^{-1/3} dL \quad \text{Ec. 8-19}$$

que conduce a la tradicional ley espectral de Kolmogorov de los 5/3

$$E(k)dk \approx \varepsilon^{2/3} k^{-5/3} dk \quad \text{Ec. 8-20}$$

Es de suma importancia estudiar la estructura de la turbulencia en la difusión, por lo que si se supone que $v(L) \approx L^\xi v(L) \approx L^{\xi-1}$, con ξ a un exponente de escala. Paladin y Vulpiani (1987) entre otros, han demostrado que los momentos de la distancia relativa R entre un par de partículas se escala con el tiempo como

$$\langle R^{2q} \rangle \approx t^{2q(1-\xi)} \quad \text{Ec. 8-10}$$

Como consecuencia, el valor medio del cuadrado del desplazamiento R como una función del tiempo a largo plazo.

$$\langle R^2 \rangle \approx t^{2/(1-\xi_1)} \quad \text{Ec. 8-22}$$

El tipo de difusión clásico browniano es mayor, y también según Richardson (1925), con el exponente 1/3 asociado a la escala de Hurst

Ec. 8-23

$$\langle R^2 \rangle \approx t^3$$

El hecho de que la disipación no es constante, asumida en Kolmogorov K41, y que además se escala espacialmente lleva a una definición más general K62 de los máximos exponentes de escala de las funciones de estructura de modo que ahora $\zeta_p = f(h, p)$ y no sólo $\zeta_p = hp = p/3$.

Ec. 8-24

$$\langle v(L)^p \rangle \approx L^{p/3} \langle \varepsilon(L)^{p/3} \rangle \approx L^{\zeta_p}$$

Tal como detalla Frish(1995) la primera teoría que predice los máximos exponentes de la función de estructura, fue de hecho dada también por Kolmogorov en 1962, con la contribución de Obukhov, basándose en las críticas de Landau, esta teoría se basa en abandonar la distribución normal o de Gauss, asumiendo que es de forma log-normal como se comporta la función de distribución de probabilidad de la disipación

Ec. 8-25

$$\Pr[\ln \varepsilon(x)] \approx \exp \left[-\frac{(\ln \varepsilon(x) - \langle \ln \varepsilon(x) \rangle)^2}{2\mu} \right]$$

Y esta nueva constante describe la intensidad de la fluctuación de la disipación en una escala de tiempo logarítmica es lo que actualmente se conoce como el parámetro de **intermitencia**, este parámetro se ha medido para turbulencia homogénea isotrópica estacionaria dando valores en el rango de 0,2 a 0,6; pero la turbulencia de las situaciones reales parece mucho más complicado como se comenta por Mahjoub et al (1998)

Ec. 8-26

$$\langle \partial \varepsilon(r) \partial \varepsilon(r+L) \rangle \approx \langle \varepsilon^2 \rangle (L/L_0)^{-\mu}$$

Con esta teoría, los exponentes de escala que dependen tanto de p y el parámetro de intermitencia, por lo que la expresión para el orden p de la función de estructura de la velocidad será:

Ec. 8-27

$$\langle v(L)^p \rangle \approx L^{p/3} L^{\mu p(3-p)/18}$$

Y la expresión de los espectros de energía en función del número de onda modifica la ley K41 de cascada no intermitente 3D dada por los 5/3 como:

Ec. 8-28

$$E(k) \approx \varepsilon^{2/3} k^{-5/3-\mu/9}$$

De manera similar, la superficie media de un derrame o una pluma de un trazador se modifica por la intermitencia

$$\langle R^2(t) \rangle \approx t^{51/(18-\mu)} \quad \text{Ec. 8-29}$$

La expresión general de la función de estructura os en escala exponencial es:

$$\zeta_p = \frac{p}{3} + \frac{\mu}{18} p(3-p) \quad \text{Ec. 8-30}$$

Si usamos la relación entre la dimensión fractal (o más exactamente el máximo de las medidas multifractales que describen los contornos de disipación) se puede relacionar con la intermitencia siguiendo el argumento en un flujo estratificado dado por Redondo (1990) o Jou (1997), si cada remolino se divide por dos en un proceso de cascada turbulenta:

$$L(n) = L_0 2^{-n} \quad \text{Ec. 8-31}$$

Podemos relacionarlo con la definición geométrica (o topológica) de la dimensión fractal calculada mediante el método de “box counting”

$$N(n) = N_0 2^{Dn} \quad \text{Ec. 8-32}$$

El volumen en la etapa “n” de generación n de una cascada de vórtice intermitente es.

$$V(n) = N(n)L(n)^3 \approx N_0 L_0^3 2^{-(3-D)n} \quad \text{Ec. 8-33}$$

Con un ratio de volumen de una generación de remolinos a la siguiente que puede expresarse como:

$$\beta(n) = V(n)/V_0 = 2^{-(3-D)n} = [L(n)/L_0]^{3-D} \quad \text{Ec. 8-34}$$

Si aplicamos la definición de la disipación, podemos expresarla en función del volumen no ocupado por los remolinos que sería la consecuencia espacial a diversas escalas de la intermitencia.

$$\varepsilon \approx \beta(n)v^3(n)\tau^{-1}(n)v(n) \approx [\varepsilon L(n)\beta^{-1}(n)]^{1/3} \quad \text{Ec. 8-35}$$

Por tanto el espectro sera

$$E(n) \approx \beta(n)\varepsilon^{2/3} [L(n)/\beta(n)]^{2/3} \quad \text{Ec. 8-36}$$

$$E(k)dk \approx \varepsilon^{2/3} k^{-5/3} [kL_0]^{-(3-D)/3} dk \quad \text{Ec. 8-37}$$

Y para la expresión de las funciones de estructura de la velocidad en función de la escala:

$$\langle v(L)^p \rangle \approx \varepsilon^{p/3} L^{\zeta_p} \quad \text{Ec. 8-38}$$

Y así se obtiene lo que se denomina el método Frish multifractal (1995) mas elemental popularizado por Frish (1995), así se relaciona el orden de la función de estructura p con la dimension fractal máxima asociada al campo de velocidades D .

$$\zeta_p = \frac{p}{3} + (3-p)\frac{(3-D)}{3} \quad \text{Ec. 8-39}$$

Si queremos estimar la difusión en un ambiente fractal, podemos sustituir la primera estructura por la función exponente de escala ($p=1$) quedando:

$$\zeta_1 = \frac{1}{3} + (3-1)\frac{(3-D)}{3} = \frac{1}{3}(7-2D) \quad \text{Ec. 8-40}$$

Si supone que es constante la fracción de energía que pasa de una escla a la siguiente, pero contiene en sí mismo una propiedad estadística de intermitencia, que se caracteriza por una distribución de probabilidad $P(\beta^n)$, donde los β^n son independientes y distribuidos como variables aleatorias. Este modelo se conoce como modelo β al azar. Los momentos de orden p de la velocidad en el modelo beta aleatorio serían

$$\langle v_n^p \rangle = \iiint dB_1 dB_2 \dots P(\beta_1 \beta_2 \dots) v_n^p \quad \text{Ec. 8-41}$$

Paladin y Vulpiani dieron una expresión sencilla de $P(\beta)$, para únicamente dos tipos de procesos de rotura. Una ruptura en láminas de vórticidad ($\beta=0,5$) y una ruptura estándar sin reducción de volumen que corresponde a $\beta=1$. La distribución de probabilidad bimodal, según ellos, asumen que tiene la forma:

$$P(\beta) = x\delta(\beta-0,5) + (1-x)\delta(\beta-1) \quad \text{Ec. 8-42}$$

con coeficientes δ ajustados experimentalmente. El límite de $x = 0$ se corresponde con el modelo estándar de Kolmogorov K42, siendo δ la delta de Dirac y x un parámetro que para $x=1$ se ajusta al modelo β . El valor de x que obtiene un mejor ajuste de los máximos exponentes de escala con los datos experimentales resulta ser $x \approx 0,125$. Con este valor de x , se obtiene un ajuste muy bueno para los exponentes de escala. Vale la pena mencionar que las características multifractales no tienen ningún efecto sobre las propiedades de difusión, sólo dependen de la ley de escala para el primer momento de la velocidad, que es prácticamente invariable por multifractalidad.

Hay varios métodos de obtener mapas de difusividad mediante imágenes. Para obtener una estimación más realista hay que tener en cuenta que la distribución espacial / temporal es no-homogénea (con intermitencias en el sentido de Kolmogorov 62 obtenida como las correlaciones espaciales de la disipación turbulenta, o de las funciones de la estructura) y estos valores se pueden utilizar para parametrizar tanto turbulencia de la superficie del mar como turbulencia atmosférica en una variedad de escalas. Es posible que diferentes dimensiones fractales se deban a diferentes niveles de intermitencia (y por tanto diferentes espectros, que no son necesariamente de inercia, ni en el equilibrio). Estas técnicas son útiles para proporcionar estimaciones más realistas de las variaciones espaciales y temporales de la dispersión horizontal en el medio ambiente, que reflejan la influencia de la distribución espectral de energía de

la difusividad local en términos de una Ley de Richardson generalizada Castilla et al (2007).

La influencia del oleaje en el coeficiente de dispersión ha sido poco estudiada y tratada brevemente en el estado del arte. Davidov (1989) sugirió que afecta de dos maneras: por medio del flujo de masa y por el aumento de los procesos turbulentos. Cuando una gota de trazador se libera en presencia de oleaje, se puede observar que el punto se mueve en el sentido de aproximación de la ola, con la máxima velocidad en la superficie y decreciendo con la profundidad. Además, las olas contribuyen con la turbulencia al aumento de los procesos de mezcla, como se puede ver en Masch (1963) hay una buena correlación del coeficiente de difusión horizontal y la corriente de superficie y el vector resultante de la velocidad del flujo oscilatorio u_m

Davidov (1989) mostró que la variación vertical de la componente de velocidad horizontal del flujo oscilatorio (u'_j) es otra fuente de energía turbulenta. El tratamiento teórico llevado a cabo por Davidov (1989) es una contribución general del oleaje en el transporte de contaminantes, sin tener en cuenta los efectos individuales de la turbulencia, las olas y las corrientes.

Zeidler (1976) realizó una serie de experimentos en el Mar Báltico en los que vió que el exponente de la evolución de la extensión del trazador en el tiempo era fuertemente dependientes de la distancia de la costa, según una relación del tipo:

$$\sigma^2 \propto t^{n(y)} \quad \text{Ec. 8-39}$$

Con el exponent $n(y)$ entre 2,3 y 1,2, exponentes de diffusion anómala, lejos de la Ley. de Richardson de los 4/3, según la cual el coeficiente de diffusion depende del tamaño a los 4/3:

$$K \propto \varepsilon^{1/3} \ell^{4/3} \quad \text{Ec. 8-40}$$

Lo que corresponde a una dependencia temporal del tipo.

$$\sigma^2 \propto t^3 \quad \text{Ec. 8-41}$$

Los experimentos de by Zeidler (1976) en un canal de oleaje muestran una dispersion homogénea para oleaje sin rotura sin corriente. Por ejemplo los coeficientes de diffusion longitudinal y transversal eran constantes (sus varianzas varían linealmente con el tiempo), dependiendo solo del Número de Reynolds del oleaje R_w :

$$R_w = \frac{a^2}{vT} \left(\sinh \frac{2\pi h}{L} \right)^{-1/4} \quad \text{Ec. 8-42}$$

Es un parámetro adimensional dónde a/T es la velocidad orbital.

En la publicación de Díez et al. (2008) adjunta como anexo 3 se muestran comparaciones con modelos numéricos en un amplio rango de valores.

Según Zeidler.(1976) se puede ver que la diffusion costera es mayor en condiciones de campo que en laboratorio, creciendo con el tiempo y con el tamaño del vertido inicial. En otras palabras, la dispersion por oleaje no es linealmente dependiente del tiempo, probablemente por la superposición de diferentes efectos como la diffusion

generada por el flujo oscilatorio, turbulencia generada por fricción de fondo de olas y corriente y la cizalla debida a gradientes espaciales del flujo medio. Los efectos originados por la interacción lineal y no-lineal entre oleaje y corrientes también deben tenerse en cuenta. Para estudiar todos estos efectos, se deben tomar medidas detalladas del campo de velocidad y de los episodios de mezcla.

Según los experimentos realizados en el Delta del Ebro descritos en el capítulo 6 y analizados por Mahoub 2000 podemos relacionar valores de las funciones de estructura con la difusividad de las manchas. Mahoub también compare una serie de experimentos realizados en el Báltico en la bahía de Knebel Vig en Dinamarca con un nivel de turbulencia mucho mayor.

A partir de medidas de velocidad a distinta profundidad los exponentes de la función de estructura de primer orden fueron entre 0,34 y 0,36 para el Delta del Ebro y entre 0,36 y 0,38 para el Báltico.

$$K \propto \varepsilon^{1/3} \ell^{H+1} \quad (\text{Ec. 8.43})$$

Como

$$H = \frac{1}{3} - \frac{3-D}{3} \quad (\text{Ec. 8.44})$$

Los casos con menor dimensión fractal tienen menor difusividad. Cuando pasa mucho tiempo se llena el espacio y se llega al valor límite de $K \sim l^{4/3}$. Con manchas de fractalidad que tienden a $D_3=2,4$ no se puede cumplir la Ley de Richardson $K \sim l^{4/3}$ y si se modifica por el hecho de que la disipación no es uniforme. La falta de uniformidad de la disipación de energía turbulenta se puede medir a partir de la dimensión fractal, dando una variación de la difusividad con la escala especial como:

$$K \propto \varepsilon^{1/3} \ell^{(D+1)/3} \quad \text{Ec. 8-39}$$

De la misma forma a partir del cálculo de las funciones de estructura de la velocidad turbulenta se puede poner

$$K \propto \varepsilon^{1/3} \ell^{\zeta_1+1} \quad \text{Ec. 8-39}$$

Con lo cual podemos relacionar los valores del exponente de Hurst H con el orden p de las funciones de estructura y con la dimensión fractal D, como según se ve en el apéndice $\zeta_p = Hp$ y en el caso de la difusión $\zeta_1 = H = (D-2)/3$.

Los valores medidos tanto en playas abiertas como en zonas confinadas dan valores de difusividad que dependen de la escala con exponentes entre 0,9 y 1,5.

Solo en los casos sin intermitencia y sin fractalidad ($D^3=3$) se cumpliría la Ley de Richardson.

A partir de las medidas de funciones de estructura en el Báltico y en el Delta del Ebro tenemos valores de dependencia de la difusividad con la escala con exponentes promedios de 1,35 en el Delta y 1,37 en el Báltico, ambos ligeramente superiores a la Ley de Richardson 1,33, lo que se correspondería a cierta hiperdifusividad. Por el contrario las medidas realizadas en playas confinadas y en el entorno del Puerto dan valores inferiores, entre 0,9 y 1,13. Es interesante resaltar que cuando la dimensión

fractal de las manchas a pequeña escala es de $D=2,4$ entonces la dependencia espacial de la difusividad tiende a 1,13.

También es importante resaltar la complejidad de la interacción no-lineal de los distintos agentes que producen difusión en el mar. Se comprueba que es posible que la intermitencia de la turbulencia pueda parametrizarse mediante medidas fractales y que el uso de momentos de orden superior ayuda a comparar medidas de difusión a distintas escalas mediante la Ley de Richardson Generalizada que relaciona la pendiente del espectro con la dependencia temporal de la difusión. Así se puede relacionar para los distintos forzamientos las relaciones entre el exponente Hurst, la pendiente del espectro, las funciones de estructura, y las distintas intermitencias a distinto orden.

En la figura 8.29 se comprueba la escasa correlación de los datos sin tratar de los distintos agentes forzadores en las medidas de difusión de trazadores en el puerto de Barcelona.

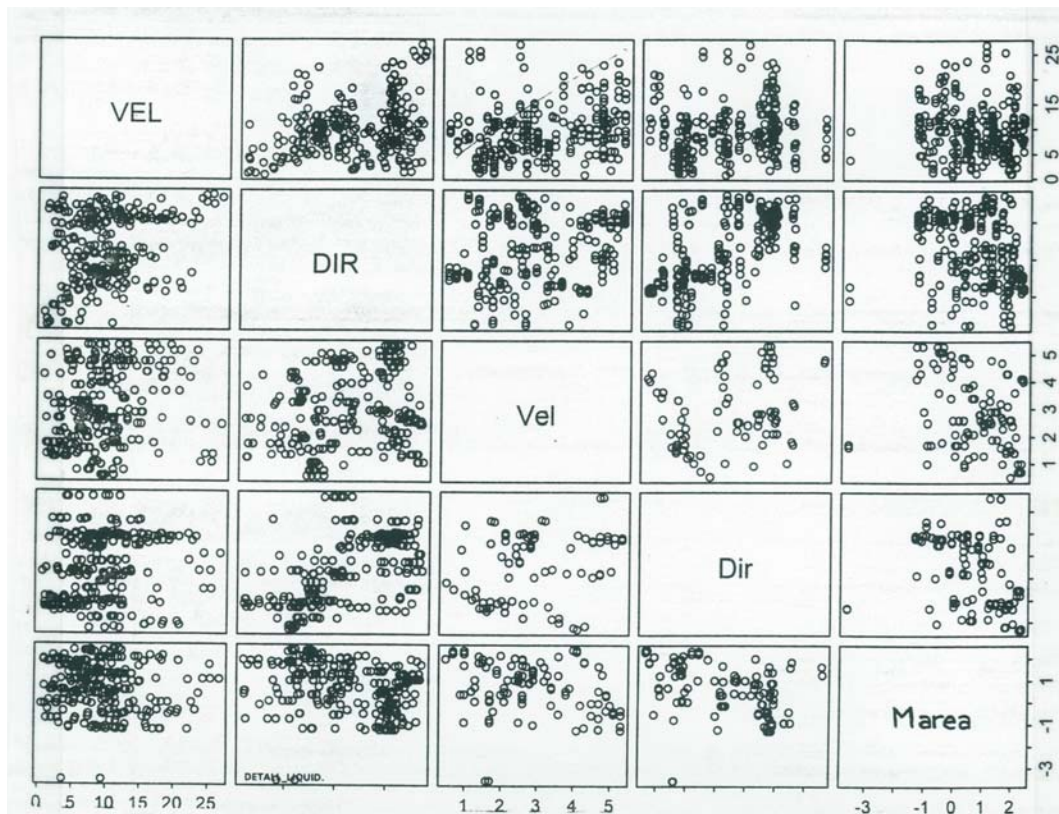


Figura 8.29. Correlaciones de los agentes forzadores en el puerto de Barcelona.

9 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

9.1 PRINCIPALES CONCLUSIONES

Entre las principales conclusiones de esta tesis, según los objetivos planteados, se destacan las siguientes:

Se han obtenidos numerosos parámetros de la caracterización experimental de los procesos de advección y difusión, en diferentes ámbitos de aguas costeras, con una buena estimación de los agentes forzadores, que pueden ser útiles para posteriores investigaciones. Este trabajo sintetiza el análisis de decenas de horas de vídeo y centenares de imágenes SAR de satélite. Se ha participado en campañas experimentales multidisciplinares que han permitido caracterizar los diferentes agentes actuantes en la dispersión ambiental (oleaje, corriente, marea, viento, ...) de forma detallada. Al disponer datos de diferentes escenarios, con diferentes condiciones ambientales, a diferentes escalas se ha podido hacer una comparación de los mismos que permite generalizar resultados.

En cuanto al instrumental y metodología:

- Los sistemas de captación: el láser tiene una gran penetración y por ello se emplea mucho para el análisis de flujos; la estereofotogrametría es de alta precisión pero mayor complejidad, el video es un sistema simple y de gran versatilidad. El infrarojo permite visualizar calor.
- Las imágenes en blanco y negro ofrecen mayor resolución que las de color.
- Las resoluciones espacial y temporal determinan el instrumental necesario (frecuencia de muestreo, error medio, etc), la georeferenciación, el soporte del instrumental y su disposición, por lo que es básico definir a priori qué se quiere medir. Es importante tener en cuenta que todas las transformaciones en los bordes de la imagen pueden producir errores importantes, por lo que es recomendable no tener en consideración al menos el 10% periférico.
- Conviene, especialmente en experimentos de campo, tener una planificación detallada y capacidad de improvisación.
- Las imágenes promediadas permiten obtener valores medios con facilidad y las series temporales de una fila o columna obtener espectros. Así mismo el análisis fractal de los contornos permite distinguir el tipo de mancha (petróleo o algas)

El tratamiento digital de imágenes se ha validado como una técnica no intrusiva que permite obtener medidas simultáneas de una zona (no de un solo punto) y relativamente barata. Algunas de sus aplicaciones ya se han comercializado y han resultado ser sistemas útiles para la gestión de zonas costeras. Por ejemplo, para el análisis de la regresión de playas, la detección de corrientes de retorno en zonas de baño, caracterización del oleaje (dirección, frecuencia, altura, espectros de energía,..) y especialmente de la zona de swash, donde es difícil instalar sensores. Así se puede obtener la parametrización de los valores medios del oleaje (frecuencia, altura, peralte, dirección), su espectro de energía e incluso identificar alteraciones de la batimetría, como se ha visto. Se han desarrollado aplicaciones de técnica en numerosos campos de la ciencia y de la ingeniería: desde comportamiento de medios granulares, radares de velocidad, restauración de fachadas a dispersión de contaminantes.

Con las imágenes por satélite del radar de apertura sintética (SAR) se obtiene una imagen ficticia donde la intensidad es una medida indirecta de la rugosidad superficial.. Además presentan la ventaja de que permiten tomar imágenes de noche, con nubes, etc. El hecho de que las órbitas definan de forma regular el paso por las mismas zonas

permite hacer un estudio sistemático y a gran escala, ya que las imágenes abarcan un dominio kilométrico.

Del análisis de resultados cabe destacar:

Los coeficientes de difusión obtenidos en los experimentos presentan una dependencia característica con la escala temporal y espacial de los fenómenos predominantes. La distribución de una sustancia depende de la interacción de múltiples escalas, por lo que el estudio en distintos escenarios permite un análisis mucho más amplio. En este estudio se tomaron medidas de: la zona de rompientes en la barra del Trabucador (Delta del Ebro), estratificación de flujos en la cuña salina del Delta del Ebro, aguas confinadas en el puerto de Barcelona, mar abierto en el Mediterráneo Occidental.

La comparación de la evolución de las manchas en zonas de oleaje con o sin rotura muestra que los valores de los coeficientes de mezcla y de la anisotropía son mucho mayores en el caso con rotura que en el caso sin rotura. La rotura favorece claramente el proceso de mezcla debido a la turbulencia generada por ésta y que esta diferencia crece con el tiempo.

La ley de Richardson o de los 4/3, según la cual el coeficiente de dispersión es proporcional al tamaño de la mancha elevado a 4/3, no es directamente aplicable en la difusión en Zona de Rompientes, debido a que la rotura produce condiciones con un subrango inercial pequeño y en cambio se verifica su dependencia del tamaño de la mancha. En la zona de rompientes presenta una fuerte dependencia del punto de vertido, con un máximo en la zona intermedia entre la orilla y la rotura.

Según Zeidler (1976) debe haber un crecimiento del coeficiente de difusión K_i aproximadamente lineal para valores altos del número de Reynolds entre 10^3 y 10^6 ; sin embargo los resultados no confirman esta ley, pues en los experimentos de Recife, Delta y Puerto de Barcelona había otros efectos más importantes como marea, corrientes, viento y condiciones de contorno, que producen estiramientos por cizalla.

En el puerto de Barcelona el rango de valores de difusividad es de $0,1-5\text{m}^2\text{s}^{-1}$, consistente con el nivel de turbulencia ambiente y en general cumple con la Ley de Richardson. Sin embargo, hay experimentos en zonas donde se producen elongamientos y alteraciones locales donde no es aplicable la Ley. Por ello es importante distinguir las zonas de ensayo. En la zona de aguas afuera se detectó que el efecto de la pluma del Llobregat condiciona el flujo, en los canales el efecto venturi y el efecto llenado-vaciado de la marea y en las zonas cercanas a estructuras el efecto de la difracción, reflexión y protección del viento. Estos efectos generan corrientes que actúan produciendo una cizalla que condiciona la difusión. El calado también es un factor importante para niveles de turbulencia alto, junto con la estratificación, puesto que limitan los máximos remolinos que se pueden desarrollar. Sin embargo para valores bajos de turbulencia es independiente.

Se correlacionaron los datos de viento y corriente obteniendo una buena correlación en dirección longitudinal (paralela al canal de navegación), similar a las de otros autores:

$$V_{cx} \text{ (cm/s)} = 2.306 V_{vx} \text{ (m/s)} + 0.148$$

Ec. 9-1

El hecho de que el ajuste tenga un término independiente supone que hay otros agentes forzadores, como pueden ser la marea o la pluma del Llobregat, que pueden desviar la dirección de la corriente respecto del viento significativamente, llegando incluso a oponerse a él, para vientos suaves de hasta 3 m/s. También aquí hay que tener en cuenta los efectos locales mencionados que pueden desviar algunos puntos. Otro aspecto a tener en cuenta es el tiempo que lleva actuando el viento, ya que hay un retardo en su efecto sobre la corriente.

La aplicación del método de series temporales de una línea para la caracterización del oleaje permite obtener parámetros de caracterización del mismo, incluso obtener espectros de energía. La comparativa de los espectros obtenidos con imágenes y un sensor de altura de ola muestra que se identifican las mismas frecuencias pico pero con alguna diferencia de energía, especialmente para las bajas frecuencias, ya que la limitación de la precisión de los sensores (5 cm) para registrar las bajas frecuencias puede subestimar la cantidad de energía en esa región. En la comparativa de los espectros de energía en la zona de costa, de rompientes y de orilla, puede observarse que los picos de energía se producen a las mismas frecuencias con niveles sucesivamente menores por la disipación de energía.

Las corrientes de retorno son difíciles de predecir por su interrelación con el fondo. Aparentemente también son difíciles de detectar, pero con un simple promediado de imágenes se pueden identificar. En los experimentos del Delta del Ebro se detectó una corriente de hasta 70 cm/s, asociada a alteraciones morfológicas, en condiciones de muy baja energía. Las imágenes promediadas pueden indicar las alteraciones del fondo a través de trazadores como la rotura o flotantes.

El modelo numérico LAD desarrollado en el LIM-UPC de tipo lagrangiano 3D basado en la ecuación de convención-difusión reproduce la difusión turbulenta con un algoritmo "random-walk" de partículas y ha dado buenos resultados, especialmente en dirección longitudinal. El modelo se calibró con los espectros de energía y coeficientes de dispersión medidos. En dirección transversal hay que tener en cuenta la inclinación de las imágenes y el oleaje.

Otro modelo de simulación diseñado especialmente para vertidos de hidrocarburo es SPILLSIM. El modelo se basa en una simulación cinemática de la turbulencia (Castilla 2001) con modificaciones específicas para simular el campo de turbulencia en la superficie del océano tanto en el dominio bidimensional de cascada inversa de la energía como en la región a escala más pequeña donde dominan los aspectos de difusión y mezcla por turbulencia tridimensional.

Se analizaron más de 900 imágenes del Radar de Apertura Sintética de los satélites ERS-1 y ERS-2, de tres áreas costeras europeas (Mar Báltico, Mar del Norte y el Mediterráneo NW). La investigación se realizó en el marco de trabajo del proyecto de la Unión Europea CLEAN SEAS. Más información en Platonov et al (2008). Con ellas es posible identificar y cuantificar grandes vertidos de petróleo, analizar su evolución y vejez. Resultó extraordinario el número de vertidos detectados, en el 72,6% de las imágenes analizadas.

En cuanto a la detección de contaminación mediante imágenes satélite se han analizado el número y tamaño de las manchas detectadas. Se cumple la Ley de Zipf, que indica que la frecuencia de la ocurrencia de algunos eventos asociados con las

actividades humanas es mucho mayor a escala pequeña que a gran escala, según una ley de dependencia hiperbólica (en la escala logarítmica – lineal).

El análisis de los vórtices detectados en las imágenes de satélite muestra que existen dos tipos de mecanismos-orientadores de los vórtices: uno dinámico por la influencia de la corriente Liguro-Provenzal y otro batimétrico, por la influencia de los cañones submarinos orientados perpendicularmente a la línea de la costa.

El uso de información de satélite de sensores SAR o de otro tipo puede ser de gran interés para crear una base de datos estacionales de las condiciones dinámicas de la turbulencia a mesoescala en el mar, después de varios años de observaciones se pueden extraer patrones dominantes y entender mejor las causas de las diferentes caracterizaciones topológicas.

En las condiciones simplificadas descritas anteriormente el tamaño máximo de los vórtices estables se puede caracterizar directamente por el Radio de deformación de Rossby RD en función de la raíz cuadrada de la profundidad de la termoclina local h . Hay una escala auto-similar a una muy amplia gama de escalas y una dependencia lineal entre la RD y la frecuencia de Brunt-Väisälä en la condición de un ancho h fijo, que se puede usar para predecir y controlar muchas de las características dinámicas de un área determinada a partir de observaciones por satélite.

La fuerte estratificación vertical de la superficie del agua ayuda al desarrollo de mayores vórtices. La frecuencia de N depende en gran medida del equilibrio térmico estacional, la actividad de las ondas de mezcla y otros procesos como los inducidos por alteraciones locales de la batimetría que afectan a la columna de agua. El alcance y a la distribución espacial de los vórtices es muy útil en el comportamiento predictivo de una zona marina. De tal manera, el análisis de datos más sofisticados, como la evaluación de las escalas de longitud integral o local las dimensiones fractales de la apariencia de la superficie del mar, junto con la información detallada de la posición y el tamaño de los remolinos de mesoescala dominantes del tamaño de alrededor de RD proporciona información útil sobre la turbulencia oceánica de mesoescala.

Es importante caracterizar los tipos y la estructura de los vórtices principales detectados, así como los procesos en cascada espectral que se realizan. Estos pueden ser analizados mediante métodos fractales de análisis de imágenes de la zona, así como con los modelos de la cascada turbulenta y mediciones de campo de difusión.

Los métodos de análisis multifractal se pueden utilizar para discriminar entre los diferentes procesos físicos que, a pesar de ser similares, tienen diferentes mecanismos de transporte para las diferentes escalas, o en el tiempo. Se comparan gráficas multifractales de imágenes SAR de vórtices de celdas de convección que muestran una complejidad máxima para los valores de reflectividad baja, mientras que la convección, probablemente debido a la inestabilidad básica ocurre en todas partes al mismo tiempo, presenta casi la misma la dimensión fractal de una amplia gama de intermedios reflectividad SAR.

La comparación de las medidas fractales de vertidos de crudo recientes y vertidos más desarrollados o viejos es interesante. Inicialmente la dimensión fractal es baja pero cuanto más tiempo lleva el vertido en un entorno turbulento aumenta hasta 1,5-1,6.

9.2 TRABAJO FUTURO:

El tratamiento digital de imágenes se ha mostrado como una técnica muy útil en muchos campos de investigación. Cada vez las tecnologías permiten obtener imágenes de mayor resolución, con instrumental más sencillo y sistemas de tratamiento más rápidos y on-line, de manera que todas estas técnicas se pueden sistematizar para obtener resultados casi a tiempo real.

Sería interesante realizar un mayor número de experimentos en puertos para poder caracterizar mejor el efecto de la cizalla producido por la reflexión y difracción de los muelles o el efecto venturi de los canales, la estratificación, marea, etc.

Con la nueva configuración del puerto de Barcelona se podrían analizar los cambios de flujos con la nueva bocana y a desviación del río.

Convendría realizar un estudio de la vorticidad generada en los puertos, tanto la generada por los cambios de alineación de los muelles, como los generados por las turbinas de los barcos, analizar su capacidad de movilización de sedimentos e incluso la extracción de bloques de hormigón de varias toneladas. Esta patología es un caso común en muelles de más de 20 años.



Figura 9.1. Cajones de hormigón movidos en el puerto de Vilanova.

La simulación numérica permite deducir el punto y hora de vertido teniendo en cuenta las condiciones ambientales y mediante el control del tráfico marítimo se puede saber los buques que pasaron por la zona, de manera que se puede identificar el origen de un vertido. El hecho de no escapar al ojo del satélite ya es un mecanismo disuasorio pero cuanto más precisa sea la predicción más fácil será su control, por lo que es preciso incrementar esta precisión.

En la correlación entre el viento y la corriente se producen algunas desviaciones debidas a que el viento no está desarrollado. Se podría analizar este desfase entre el viento y la corriente, o dicho de otro modo, cuanto tiempo necesita el viento para

transferirle energía a la corriente, y si este tiempo de desfase está relacionado con los niveles de turbulencia existente.

Debido a diferentes factores ambientales, como, la actividad sísmica regional, las complejas interacciones entre los vórtices y los bordes del cañón submarino, condicionando las tormentas y las acumulaciones de grandes cantidades de sedimentos en los cañones submarinos se pueden provocar fugas de productos líquidos petroquímicos en la columna de agua. Este origen natural no biológico sustancias orgánicas disueltas hasta la superficie marina puede producir manchas características de hidrocarburo en la superficie. El origen de esas filtraciones naturales pueden estar asociados con los sedimentos fangosos de carácter orgánico o con el gas líquido y los depósitos de petróleo submarino. Si esta hipótesis es correcta, se podría explicar por qué las imágenes SAR detecta múltiples características de película orgánica en la superficie del mar durante la temporada de invierno y en las áreas marinas de distancia de las costas.

Recientemente, el nuevo diseño de los recursos petroleros en alta mar los métodos de detección han avanzado y con ERS-2/RADARSAT/ENVISAT SAR / ASAR imágenes pueden ser una solución para la localización de las reservas de petróleo ricos en el fondo del mar debido a la alta incidencia de la detección de la superficie de locales el aceite se filtra a los rastros de origen no biológico.

En el caso en que estemos suficientemente alejados de la costa se puede usar el análisis dimensional teniendo en cuenta la rotación para definir un coeficiente de difusión que está basado en las anomalías de superficie del nivel del mar generadas por la rotación y son fácilmente detectables desde satélite. La evolución temporal estaría controlada por la energía cinética de los remolinos turbulentos promediados sobre una zona sin grandes variaciones de latitud (Shuckburgh et al 2009). Se puede calcular a partir del parámetro de coriolis f como

$$K = K(f, h') = \alpha \frac{g}{|f|} \sqrt{\langle h'^2 \rangle} \quad \text{Ec. 9-1}$$

La validación de esta teoría es fácilmente evaluable con imágenes SAR y realizar mapas de difusividad similares a los de la figura 8.28.

Sería conveniente para los distintos tipos de foramiento, medir simultáneamente las imágenes y medidas eulerianas o lagrangianas de boyas y así se podría tener la función de estructura y aplicar la Ley de Richardson Generalizada incluyendo la intermitencia y la dimensión fractal.

10 BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- Aagaard T y Holm J. (1989) "Digitalization of Wave Run-Up Using Video Records." *Journal of Coastal Research*, vol 5, nº3, 547-551.
- Aarninkhof SGJ. (2003) "Nearshore bathymetry derived from video imagery." PhD Thesis Delft University of Technology. 175pp.
- Albarges J. (1980) "The fate and source identification of petroleum tras in the marine environment." *Colloques Internationaux du CNRS nº 293* pp.233-247.
- Allen SE. (1988) "Rossby adjustment over a slope." Ph D thesis, Univ. of Cambridge. England. 206 pp.
- Apel JR. (1995) "Principles of ocean physics." Ed. Academic Press Limited. 4 ed. V.38. *International Geophysics Series* Edited by Renata Dmowska and James R. Holton, pp 634.
- Archetti R. (2008) "Monitoraggio e previsione della evoluzione di una spiaggia protetta da opere a cresta bassa." *Proc. Of XXXI Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche — IDRA*.
- Arnau PA. (2000) "Aspectos de variabilidad a mesoescala de la circulación marina en la plataforma continental catalana." *Tesina de especialidad. UPC*. Pp 600.
- Artale V, Boffetta G, Celani A, Cencini M y Vulpiani A. (1997) "Dispersion of passive tracers in closed basins: Beyond the diffusion coefficient." *Phys. Fluids*, 9 3162.
- Arthur R. (1962) "Rip current and their causes." *Journal of Geophysical Research*, American Geophysical Union, 67, 7, 2777-2779.
- Bahia ET. (1997) "Estudio teórico-experimental de la dispersión de contaminantes en regiones costeras." *Tesis Doctoral, ETSECCPB, Universitat Politecnica de Catalunya –UPC, Barcelona*.
- Baldock T y Hugues M. (2006) "Field observations of instantaneous water slopes and horizontal pressure gradients in the swash-zone." *Continental Shelf Research* 26, pp 574–588.
- Batchelor GK. (1967) "The Theory of homogeneous turbulence." *Cambridge monographs on mechanics and applied mathematics*. Ed. Cambridge University Press. XI, 197 pp.
- Batchelor GK. (1988) "An Introduction to fluid dynamics." Ed. Cambridge University Press. XVIII, 615 p.
- Battjes J. (1975) "Modeling of turbulence in the surf zone." *Annual Rev. Fluid Mech.* 20, 257-293.
- Battjes JA y Jansen JPFM. (1978). "Energy loss and set-up due to breaking in random waves." *Proc. of 16th Int. Conf. on Coastal Eng., Hamburg, ASCE*, pp. 569-587.
- Benetazzo A. (2006) "Measurement of water surface wave fields using a nonintrusive method based on a stereo-matching algorithm." *PhD Diss., University of Padua*.
- Bezerra MO. (2000) "Diffusion de contaminantes en la costa." *PhD Thesis, UPC*.
- Bezerra MO, Díez M, Medeiros C, Rodríguez A, Bahia E, Sánchez-Arcilla A y Redondo JM. (1998) "Study on the influence of waves on coastal diffusion using image analysis." *Applied Scientific Research* 59: pp 191-204.
- Bezerra MO, Castilla R, Sánchez MA y Redondo JM. (1995) "Turbulent diffusion in enclosed beaches." *Medcoast '95*, Ed. E. Ozhan y Ankara. Pp. 1189-1198.

- Bezerra MO y Redondo JM. (1999) "Vertical variation of horizontal eddy diffusivity, the role of waves, wind and tidal currents." Workshop on Advances in Turbulence V, Girona, Spain, 8-9 June, 1999.
- Bezerra MO, Akel AR, Araujo TRC, Krelling APM, Redondo JM (2009) "Application of aerial video images for Lagrangian tracer studies in maritime and estuarine port zones." Journal of Coastal Research SI 56. Proc. Of 10th international Coastal Symposium. Pp 787-791 Lisbon Portugal. ISSN 0749-0258
- Bishop G y Donelan M. (1987) "Measuring waves with pressure transducers." Coastal Engineering, 11, 309-328
- Boesch D. (1974). "Oil Spills and the marine photogramme." Ballinger Publisher Company Cambridge, Mass
- Bouguet JY. (2004 a) "Camera Calibration Toolbox for Matlab" <http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calibdoc/>
- Bouguet JY. (2004 b) "Diffusion of sewage effluent in an ocean current." Proc. Frist Int. Conf. on Waste Disposal in the Marine Environment, Pergamon Press, New York, pp. 246-267.
- Boussinesq J (1877) "Theorie de l'ecoulement tourbillant." Mem. Pres. Acad. Sci. Paris, vol 23, 46
- Borthwick y Joynes (1989). "Horizontal dispersion of oil pollutant in coastal waters." Proc. Int. Conf. in Hydrodynamic and Enviromental Model in Coastal, Estuarine and River Waters. U.K. University of Bradford. Pp 322-331.
- Bradshaw P. (1979) "An introduction to Turbulence and its Measurement." Ed. Pergamon Press.
- Brooks NH. (1960) "Diffusion of sewage effluents in an ocean current." Proc. of First International Conference on Waste Disposal in the Marine Environment.
- Bueno J, Aleixandre J, Tamarit J, Moreno L, Prada JM, Hernández A (1997) "Sistema óptico de medida de batimetrías del CEPYC." Ingeniería Civil, núm 106
- Candela J. (1997) "Proceedings of Course on Shallow Water and Shelf Sea Dynamics summer schools Physics, Trieste, Italy." Eds. United Nations Educational Scientific and Cultural Organization, International Atomic Energy Agency,
- Carlson CT. (1985) "Field studies of run-up on dissipative beaches." Proceedings 19th Coastal Engineering Conferences (ASCE), 399-414.
- Castilla R. (2001) "Simulacion cinematica de flujo turbulento. Aplicación al estudio de la estructura de la turbulencia y la difusión turbulenta." PhD Thesis UPC, Barcelona
- Castilla R, Redondo JM, Gamez-Monterol PJ y Babiano A. (2007) "Nonlinear Processes Geophysics."
- Chassaing P. (2000) "Turbulence en mécanique des fluides." Cépaduès éditions, 2000. XXXIV+626 pp.
- Chapman H, Purnell K, Law R y Kirby M. (2007) "The use of chemical dispersants to combat oil spills at sea: A review of practice and research needs in Europe" Marine Pollution Bulletin Volume 54, Issue 7, 827-838.
- Chen X y Allen SE. (1996) "The influence of canyon on shelf currents: A theoretical study." Journal of Geophysical Research, Vol. 101, NO C8, pp. 18.043-18.059.
- Cohen A. (2007) "Assessment of intertidal morphological changes using video monitoring" Coastal Practice Network. Delft Hydraulics.

- Damiani L y Molfetta M. (2008) "A video based technique for shoreline monitoring in Alimini (LE)" Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection Coastlab08, Bari.
- Dankert H, Horstmann J, Lehner S, Rosenthal WG. (2003) "Detection of wave groups in SAR images and radar image sequences." IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 41, 1437–1446.
- Diez M. (1998) "Estudio de la Hidrodinámica de la zona de rompientes mediante el tratamiento digital de imágenes.." Tesina de Especialidad Ingeniería de CCP, UPC, Barcelona.
- Diez M, Mosso C, Sierra JP, Mestres M, Sanchez-Arcilla A, Rodrigues A, Bezerra MO y Redondo JM. (1998) "Estimation of dispersion coefficients in low wave energy surf zone using video images." Fourth International Conference, Littoral'98, European Coastal Association for Science and Technology, Barcelona, Spain, 14-17 september, 535 – 542 pp.
- Diez M, Redondo JM, Mestres M, Platonov A y Sánchez-Arcilla A (1999) "Control de contaminantes mediante imágenes" Proc. V Jornadas de Puertos y Costas. A Coruña.
- Diez M, Sierra JP, Redondo JM, Mosso C, Bezerra MO. (1999) "Estudio hidrodinámico de la zona costera mediante el análisis digital de imágenes." Ingeniería del Agua, vol.6, nº3, 283-292 pp.
- Diez M, Bezerra MO, Sierra JP y Redondo JM (1999) "Turbulent mixing in the breaking zone." Proceedings Advances in Turbulence,
- Diez M, Bezerra MO y Redondo JM (2000) "Turbulent diffusion in the environment." XDFTG – Xarxa Temàtica de Dinàmica de Fluids i Turbulència Geofísica, 2000, p. 69-75.
- Díez M, Redondo JM, Vila J. (2001) "Estudio de corrientes y dispersión en el puerto de Barcelona." Proc. VI Jornadas de Puertos y Costas. Palma de Mallorca.
- Diez M, Bezerra MO y Redondo JM (2005) "Flow patterns and turbulent dispersion coefficients near harbours using video images."
- Diez M, Bezerra MO Medeiros C y Redondo JM. (2006) "Experimental Measurements and Diffusion in Harbour Zones." Lectures in environmental turbulence, Babiano A., Fraunie P., Redondo JM y Vassilicos JC. Ed. CIMNE, Barcelona.
- Diez M, Bezerra MO, Mosso C, Castilla R y Redondo JM. (2009) "Experimental measurements and diffusion in harbour and coastal zones." Il Nuovo Cimento della Società Italiana di Fisica C. Vol. 31 C, N. 5-6, 843-859
- Einstein, A. (1905), "Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen.", Annalen der Physik 17: 549–560.
- Erikson LiH, Hanson H. (2005) "A method to extract wave tank data using video imagery and its comparison to conventional data collection technique." Computers & Geosciences 31, 371–384.
- Faber T. (1995) "Fluid Dynamics for Physicist." Cambridge University Press.
- Fernández Varela R. et al. (2007) "Identificación y análisis del envejecimiento de vertidos de hidrocarburos en el ecosistema marino" Universidad de La Coruña
- Figueras A y Anxo M. (2004) "Resultados del ensayo de PUTIDOIL en el tratamiento de un vertido controlado de gas-oil en el puerto de Vilanova i la Geltaú" CSIC Vigo

- Flores H, Andreatta A, Llona G y Saavedra I. (1998) "Measurements of oil spill spreading in a wave tank using digital image processing" In: Proceedings of the First International Conference on Oil and Hydrocarbon Spills, Modelling, Analysis and Control, Oil Spill, pp. 165–173.
- Frisch U. (1995) "Turbulence." Cambridge University Press. pp 296.
- Fung J y Vassilicos JC. (1998) "Efectos de las variaciones en la ley espectral." Phys. Rev. E , 52 1677.
- Gabaldon J. (2000) "The effect of small-scale turbulence on the phytoplankton dynamics in the open ocean. Monitoring and numerical simulation in the vertical dimension." Tesis Doctoral, Dept de Física Aplicada, ETSECCPB, Universitat Politècnica de Catalunya –UPC, Barcelona.
- Gade M y Redondo JM. (1999) "Marine pollution in European coastal waters monitored by the ERS-2 SAR: A comprehensive statistical analysis." IGARSS 99, Hamburg, vol. III, p. 308-312.
- Gade M, Hühnerfuss H y Korenowski GM. (2006) "On the imaging of biogenic and anthropogenic surface films on the sea by radar sensors", in Marine Surface Films: Chemical Characteristics, Influence on Air-Sea Interactions, and Remote Sensing, Eds, Springer, Heidelberg, 342 pp., 189-204.
- García J, Herranz D, Negro V, Varela O, Flores J. (2003) "Tratamiento por color y video." VII Jornadas Españolas de Costas y Puertos.
- Garrat JR. (1992) "The atmospheric boundary layer." Cambridge University Press pp 316.
- Gerani A, La Rosa G y Patania F. (2001) "The use of thermal infrared imagery for the control of pollutions in Mediterranean Sea." Proc of Int Symposium of the Mediterranean Sea. Chipre IAWQ. Pp. 69-78.
- Giacomazzi E, Bruno C. y B. Favini (1999) "Fractal modelling of turbulent mixing". Combustion Theory Modelling 3, 637-655. IOP.
- Goldstein SE. (1951) "On diffusion by discontinuous movements and on the telegraph equations." Quart. J. Mech. 4, Part 2, pp. 129-156.
- Grau J. (2005) "Processat digital d'imatges aplicat a l'anàlisi de seqüències Meteosat." Ph.D. Thesis, UPC.
- Guillén J, García-Olivares A, Ojeda E, Chic O, Osorio A y González R. (2008). "Longterm quantification of beach users using video monitoring." Journal of Coastal Research, 24 (6), doi: 10.2112/07-0886.1).
- Gunnerson CG (1959 a) "Sewage disposal in Santa Monica Bay." Trans. Amer. Soc. Civ. Engrs. 124, 823-842.
- Gunnerson CG (1959 b) "Discussion of eddy diffusion in homogeneous turbulence." Proc. Amer. Soc. Civ. Engrs. 85, HY4, April pp. 101-109.
- Harris G. P. y Lott J. N. A. (1973) Observations of Langmuir circulations in lake Ontario. Limnology and Oceanography
- Harris T, Jordaan J, McMurray W, Verwey C y Anderson F. (1963) "Mixing in the surf zone." International. Jour. Water Pollution, Vol. 7, 649-667.
- Harris WD y Umbach MJ (1972) "Underwater mapping." Photo. Eng. Sensing, 38, 765-772.

- Hequan S, Dahong Q, Yongming S, Yongxue W, (2004) "Wave measurement based on light refraction." *Acta Oceanologica Sinica* 23 (2), 359–366.
- Hernández D, Varea C y Barrio R. (2006) "Wave front dynamics with directional anomalous diffusion." *Phys. Rev. E*, vol. 74, 046116.
- Hernández D, Barrio R y Varea C. (2009) "Reaction diffusion dynamics in a subdiffusive regime." *Phys. Rev.E*, vol. 79, 026109.
- Hesselink L. (1988) "Digital Image processing in flow visualization." *Annual Rev. Fluid Mech.*, 20, 421-485.
- Hilsenstein V. (2005) "Surface Reconstruction of WaterWaves using Thermographic Stereo Imaging." *Proceedings of the Image and Vision Computing New Zealand (IVCNZ 2005)*, Dunedin, New Zealand, pp. 102–107
- Hinze J. (1975) "Turbulence." McGraw Hill Book Co., New York, USA, 2 ed.. 790 pp.
- Holland K, Holman R y Sallenger A. (1991) "Estimation of overwash bore velocities using video techniques." *Coastal Sediments ASCE*, pp. 489-497.
- Holland K, Raubenheimer B, Guza R y Holman R. (1995) "Run-up kinematics on a natural beach" *J. Geophys. Res.*, 100(C3), 4985-4993.
- Holman RA y Sallenger A. (1985) "Setup and Swash on a Natural Beach" *Journal of Geophysical Research* Vol.90, No. C1, 945-953.
- Holman R y Lippmann T. (1987) "Remote sensing of nearshore bar systems making morphology visible." *Coastal sediments, ASCE*, pp. 929-944.
- Holman RA y Sallenger AH (1992) "The Argus program: application of video remote sensing to the study of nearshore processes." *ICCE – Venice*, pp. 417-418.
- Holman RA y Stanley J. (2007) "The history and technical capabilities of Argus." *Coastal Engineering*, 54 (6–7), 477–491.
- Horikawa K (1988) "Nearshore dynamics and coastal processes." University of Tokyo Press, Tokyo.
- Horikawa K, Lin MC, Sasaki TO. (1978) "Mixing of heated water discharged in the surf zone." *Proc. Int. Conf. on Coastal Engineering, ASCE*, 2563-2583.
- Hotta S y Mizuguchi M. (1980) "A field study of waves in the surf zone." *Coastal Engineering in Japan*, vol. 24, 41-76.
- Hull P y Müller G. (2002) "An investigation of breaker height, shape and pressure." *Ocean Engineering* 22, 59-79.
- Ibañez O, Rabuñal J, Castro A, Dorado J, Iglesias G y Pazos, (2007) "A frame work forme a surging waves level in a wave tank with artificial vision techniques." *WSEAS Transactions on Signal Processing* 3 (1), 17–24.
- Iglesias G, Ibañez O, Castro A, Rabuñal y J.R, Dorado J. (2009) "Computer vision applied to wave flume measurements." *Ocean Engineering* 36, 1073–1079.
- Inman DL, Tait RJ y Nordstrom CE (1971) "Mixing in the surf zone." *Journal of Geophysical Research*, Vol 76, nº 15, 3493 – 3514.
- Jensen A. Pedersen GK y Wood DJ (2003) "An experimental study of wave run-up at a steep beach." *J. Fluid Mech.* (2003), vol. 486, pp. 161–188.
- Jimenez JA, Osorio A, Marino-Tapia I, Davidson M, Medina R, Kroon A, Archetti R, Ciavola P y Aarnikhof S. (2007) "Beach Recreation Planning Using Video-derived Coastal State Indicators." *Coastal Engineering*, 54, 507–521.

- Jolly, G. W., A. Mangin, F. Cauneau, M. Calatuyud, V. Barale, H. M. Snaith, O. Rud, M. Ishii, M. Gade, J. M. Redondo and A. Platonov. (2000). The Clean Seas Project (ENV4-CT96-0334) Final Report <http://www.satobsys.co.uk/CSeas/report.html> DG XII/D of the European Commission under contract N° ENV4-CT96-0334. Bruselas, pp. 1 -75.
- Joseph J y Sender H (1958) "Über die horizontale diffusion in meere." Dtsch. Hydrogr. Z. II, 29 pp.
- Knaapen MAF. (1997) "Filtering of Bathymetry estimations gained by video imaging of breaking waves." Master Thesis Delft University of Technology.
- Kolmogorov AN (1941) "Local turbulent structure in incompressible fluids at very high Reynolds number." Doklady Ak. Nauk SSSR 30, 299-303.
- Kolmogorov AN (1962) "Mecanique de la turbulence." Coll. Intern. Du CNRS à Marseille, Paris, CNRS, pp. 447-458
- Kraus N, Isobe M, Igarashi H, Sasaki T y Horikawa K. (1982) "Field experiments on longshore sand transport in the surf zone." Coastal Engineering, ASCE, 969-988.
- Kroon A, Davidson MA, Aarninkhof SGJ, Archetti R, Armaroli C, Gonzales M, Medri S, Osorio A, Aagaard T, Holman RA y Spanhoff R (2007) "Application of remote sensing video systems to coastline management problems." Coastal Engineering, 54, 493-505.
- Kuriyama Y y Ozaki Y. (1993) "Longshore current distribution of a bar-trough beach-Field measurements at HORF and numerical model." Report Port and Harbour Research Institute, Vol. 32, n° 3, 3-37.
- Landau LD y Lifshitz EM (1997) "Fluid Mechanics." Course of theoretical physics, v.6, Ed. Butterworth – Heinemann, 2 Ed.
- Lee JH y Veronis G. (1989) "Determining velocities and mixing coefficients from tracers." Journal of Phys. Ocean., American Meteorological Society, Vol. 19, April, 487-500
- Lee-Lueng F, Dudley C, Le Traon P, Rosemary M (2010) "Eddy Dynamics from Satellite Altimetry" Oceanography Society, Vol. 23 , N. 4 , P. 14-25. <http://archimer.ifremer.fr/doc/00026/13744/10874.pdf>
- Lesieur M. (1997) "Turbulence in fluids." Kluwer Academic Publishers, 3 Ed.
- Lichtenegger J. (1993) "ERS-1 SAR images for oil spill surveillance (Northwest spanish coast, La Coruña)." Oil Watch Eurimage. Via E. D'Onofrio, 212.00155 Roma.
- Lippmann TC y Holman RA. (1989) "Quantification of sand bar morphology: A video technique based on wave dissipation." Journal of Geophysical Research.,94 (C1), 995-1011.
- Lippmann TC y Holman RA. (1991) "Phase speed and angle of breaking waves measured with video techniques." Coastal Sediments, ASCE, pp. 542-556.
- Lippmann TC y Holman RA. (1992) "Wave group modulations in cross-shore braking patterns." ICCE, ASCE, 918-931.
- Lippmann TC, Holman R y Hathaway K. (1993) "Episodic, non stationary behavior of a double bar system at Duck, N.C., USA, 1986-1991." Journal of Coastal Research, SI,15, pp. 49-75.
- Lippmann TC y Thorton EB. (1994) "The spatial distribution of wave rollers and turbulent kinetic energy on a barred beaches." Proc. Coastal Dynamics'94.

- Longuet-Higgins MS y Turner JS. (1974) "An entraining plume model of a spilling breacher." *Journal of Fluid Mechanics*, 63(1): 1-20.
- Luger SA Monteiro PMS y Van Ballegooyen R. (1999) "Predicting changes to hydrodynamics, water quality, Sediment transport and wave resonance characteristics in Saldanha Bay resulting from alternative Port expansion layouts." CSIR, Environmentek, P O Box 320, Stellenbosch, 7599.
- Mahjoub B.O., Babiano A. y Redondo J.M. (1998) . *Applied Scientific Research*. 59 , 299-313.
- Mahjoub, B. O. (2000) Intermittency and non-local dynamics PhD Thesis UPC. Barcelona
- Mahjoub O.B., Redondo J.M. y Babiano A. (2000) Self similarity and intermittency in a turbulent non-homogeneous wake. *Proceedings of the Eighth European Turbulence Conference*. (Eds. Dopazo et al.) CIMNE, Barcelona. 2000. p.783-786.
- Maresca J y Seibel E. (1976) "Terrestrial photogrammetric measurements of breaking waves and longshore currents in the nearshore zone." *Proc. I.C.C.E., ASCE*, pp. 681-700.
- Marrasé C, Saiz E y Redondo JM. (1997) "Lectures on plankton and turbulence." *Sci. Mar.*, 61 (Supl.1).
- Martínez M, Cotos M, Arias J y Tobar A (1998) "Cálculo de Corrientes superficiales marinas a partir de imágenes térmicas NOAA y estimación de la influencia de los vientos en su aparición: aplicación al suroeste de la Península Ibérica." *Revista de Teledetección num 9*.
- Martínez Benjamin JJ. (1995) "Satellite microwave sensing for oceanographic studies." *Mixing in Geophysical Flows*. JM Redondo y O Metais (Eds.). CIMNE, Barcelona.
- Masch FD. (1963) "Mixing and Dispersion of Wastes by Wind and Wave Action." *International Journal of Air Water Poll.*, vol. 7, pp 697-720.
- Mash FD (1961) "Mixing and dispersive action of wind waves." *Inst. Engr. Res. Tech. Rep.*, Series 138, Issue 6, Uni. of California, Berkeley, 106 pp.
- Mash FD. (1963) "Mixing and dispersion of wastes by wind and wave action." *Int. J. Air. Wat. Polt.* Pergamon Press, vol.7, 697-720.
- Matulka A (2009) "Turbulent Structure in Environmental Flows: Effects of Stratification and Rotation." PhD Tesis. Ingeniería Ambiental. UPC
- Medeiros C, Bezerra MO y Redondo JM. (1996) "Turbulent dispersion in confined beaches." 39th Brazilian Geology Congress, 455-493.
- Medina R, Marino-Tapia I, Osorio A, Davidson M y Martin FL. (2007) "Management of dynamic navigational channels using video techniques." *Coastal Engineering*, 54, 523–537.
- Meneveau C y Sreenivasan KR (1991) "The multifractal nature of turbulent energy dissipation." *J. Fluid Mech*, 224, 429–484.
- Mestres M, Díez M, Sierra JP, Rodriguez A y Sánchez-Arcilla A (1998) Modelling the dispersion of dye spots in coastal waters. *Proc 4th Int Conf Littoral*.
- Michelson I. (1954) "Discussion and extension of Goldstein mathematical model representing diffusion with hyperbolic partial differential equations." *Amer. Inst. Aerolog. Res.*, Report under Contract AFI 8(600)-746.

- Monin AS. (1970 a) "Main features of turbulence in the sea." *Oceanology* 10, 184-189.
- Monin AS. (1970 b) "On turbulent flow in the ocean." *Doklady Ak. Nauk SSSR* 193, 1038-1040.
- Monin AS y Ozmidov RV. (1985) "Turbulence in the ocean." *Environmental Fluid Mechanics*, Kluwer Ac Publisher, Dordrecht. pp 247. Trad. H. Tennekes, Editor GTCsanady.
- Moore SF y Dwyer RL (1974) "Effects of oil on marine organisms: A critical assessment" of published data *Water Research* Vol 8, Issue 10, 819-827.
- Mösso C, Sierra JP, Díez M, Sanchez-Arcilla A, Rodriguez A, Santás JC y Ruiz V (1998) "Experimental study of wave deformation in the near-shore zone. Delta'96 case." *Proc 4th Int Conf Littoral*, pp 323-332.
- Mösso C (2003) "Estudio numérico-experimental de la dinámica de la zona cercana a la costa." Tesis doctoral. UPC <http://www.tdx.cat/TDX-1213104-13494>.
- Mösso C, Sierra JP, Rodriguez A, Gracia V y Barnadas J. (2007) "Estudio experimental de la evolución del espectro del oleaje en una playa." *Revista Ingeniería Hidráulica en Mexico*, Volumen XXII, nº1, pp 47-61.
- Neff JM y Anderson JW. (1981) "Response of Marine Animals to Petroleum and Specific Petroleum Hydrocarbons" *Applied Science Publishers Ltd.*, London England. 177 p.
- Neff JM. (2002) "Bioaccumulation in marine organisms: effect of contaminants from oil well produced water." Elsevier Ed.
- Obukhov AM. (1949). Structure of the temperature field in a turbulent flow. *Izv.Akad. Nauk SSSR Ser. Geogr. Geojiz.* 1 3: 58-69.
- Obukhov AM. (1962). "Some specific features of atmospheric turbulence." *J. Geophys. Res.* 67, 311,14.
- Okubo A y Ozmidov RV. (1970) "Empirical dependence of the coefficient of horizontal turbulent diffusion in the ocean on the scale of the phenomenon in question." *Oceanology* 6, 308-309.
- Okubo A. (1971) "Oceanic diffusion diagrams." *Deep-Sea Res.*, 18, 789-802.
- Ortiz C. (2008) "Estudio morfodinámico de las playas de La Magdalena (Cantabria) a partir de técnicas basadas en video." MSc Thesis. Universidad Nacional de Colombia.
- Osorio A. (2005) "Desarrollo de técnicas y metodologías basada en sistemas de vídeo para la gestión de la costa." Phd Thesis. Universidad de Cantabria.
- Osorio A. (2006) "Desarrollo de cámaras de video para hacer seguimiento de las actividades de dragado en los canales de navegación". Premio Modesto Viguera, 2006. Concedido por la ATPYC.
- Osorio, A., Pérez, J. Ortiz, C., Medina, R. (2007). Técnicas basadas en imágenes de vídeo para cuantificar variables ambientales en zonas costeras, *Avances en Recursos Hidráulicos*, Numero 16, p. 51-64.
- Ozmidov RV. (1990) "Diffusion of contaminants in the ocean." *Oceanographic Sciences Library – vol.4*, Kluwer Academic Publishers, Londres. pp 283.
- Pérez Silva RM, Abad G, Abalos A, Marañón A, Bermúdez R. (2003) "Biodegradación de naftaleno por pseudomonas Aeruginosa at18." *Tecnología química* Vol. XXIII, No. 3, pp 21-27.

- Pérez Marrero J, Cardona L, Amat García JM, Marcos V, Llinás O (2009). "Predicción operacional de las trayectorias de objetos a la deriva en alta mar." I Jornadas Nacionales De Seguridad Y Contaminación Marina
- Platonov A. (2001) "Análisis de la contaminación marina y estudio de la vorticidad." VII Jornadas de Puertos y Costas.
- Platonov A. (2002) "Aplicación de imágenes de satélite SAR en los estudios de contaminación marina y de dinámica de las aguas en el Mediterráneo Noroccidental." PhD Thesis. Dep Física Aplicada. UPC Barcelona.
- Platonov A, Carrillo A, Matulka A, Sekula E, Grau J, Redondo JM y Tarquis A (2008) "Análisis multifractal de procesos autosimilares: imágenes satélite e inestabilidades baroclínicas." Revista Internacional de Metodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, 24, (1), 25-48.
- Platonov, A. [et al.]. Multifractal observations of eddies, oil spills and natural slicks in the ocean surface. "Nuovo cimento della Società Italiana di Fisica C. Geophysics and space physics", 11 Juny 2009, vol. 31, núm. 5-6, p. 861-880.
- Prandtl L. (1925) "Modern Developments in Fluid Dynamics." Naturwissenschaften, 13, 93.
- Pritchard DW. (1956) "The dynamic of a coastal plain stuary" Journal of Marine Research. 15, 33-42.
- Redondo JM. (1990) "The structure of density interfaces." Phd Thesis, Univ. Cambridge.
- Redondo JM, Rodriguez A, Bahia E, Falqués A, Gracia V, Sánchez Arcilla A y Stive MJF. (1994) "Image Analysis of Surf-Zone Hydrodynamics." Coastal Dynamics'94, ASCE.
- Redondo JM. (1995) "Turbulent mixing in the atmosphere and ocean. Fluid Physics." Proceedings os Summer Schools. Eds. M.G. Velarde and C.I.Christov. World Scientific, 584-597.
- Redondo JM. (1996) "Turbulencia y mezcla en dinamica de fluidos geofisicos." ETSECCPB, Universitat Politecnica de Catalunya (UPC), pp 380.
- Redondo JM, Sanchez MA y Castilla R. (2000) "Vortical structures in stratified turbulent flows, in Turbulent Diffusion in the Environment." Redondo J. M.and Babiano A. Ed FRAGMA, Madrid. pp. 113-120.
- Redondo JM, Grau J, Platonov A and Garzon G (2008) "Análisis multifractal de procesos autosimilares: imágenes de satélite e inestabilidades baroclinas."Rev. Int. Mét. Num. Cál. Dis. Ing. 24(1), 25-48.
- Redondo JM, Díez M y Bezerra MO (2009) "Synthetic Turbulence" ERCOFTAC Series
- Redondo JM, Platonov A.K. (2009) "Self-similar distribution of oil spills in European coastal waters." Environmental Research Letters, vol. 4, 014008, 10 pp.
- Redondo JM, Platonov A, Matulka A, Tarquis A, Castilla R, Fraunie P, Sekula E y Díez M (2011) "Fractal measurements of ocean diffusivity" Trabajo presentado en el Instituto Pluridisciplinar de la Universidad Complutenses de Madrid http://www.ucm.es/info/fluidos/madrid/redondo_fractal_measurement_diffusion_diaz_matulka.pdf
- Reynolds O (1883) "An Experimental investigation of the circumstances which determine the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of

- resistance in parallel channels". *Philosophical Transactions of the Royal Society* 174, 935-982.
- Richardson LF (1922) "Weather prediction by numerical process." Cambridge University Press.
- Richardson LF (1926) Atmospheric diffusion shown on a distance-neighbour graph *Proc. R. Soc. A* 110 709
- Richardson LF y Stommel H. (1948) "Note on eddy diffusion in the sea." *J. Meteorol.* 5, 238-240.
- Rodríguez A, Sánchez-Arcilla A, Redondo JM, Bahía E y Sierra JP. (1995) "Measurements and modelling of pollutant dispersion in the nearshore region." *Water Science and Technology*, IAWQ, 32, 10-19.
- Rodríguez A (1997) "Estudio Experimental de la Hidrodinámica de Zona de Rompientes." PhD Thesis. Laboratori d'Enginyeria Marítima, ETSECCP, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Rodríguez A, Bahía E, Díez M, S-Arcilla A, Redondo JM y Mestres M. (1997 a) "Estudio Experimental de Procesos de Mezcla en Aguas Costeras." *Proc. IV Jornadas españolas de Ingeniería de Costas y Puertos*. Ed. J.C.Serra, pp. 643-656.
- Rodríguez A, Sánchez-Arcilla A, Bahía E, Redondo JM y Díez M. (1997 b) "Study of Surf-Zone Mixing Using Video Images. International" Conference on Coastal Engineering. ASCE.
- Rodríguez A, Sanchez-Arcilla A, Movellan E, Mosso C, Díez M, Sospedra J, Cruzado A, Velasquez Z, Naudin JJ, Oriol L y Cauwet G. (1997 c) "Experimental study of saline intrusion and river plume in the microtidal estuary of the Ebro-I" Plenary workshop FANS project. May, 1997, Blanes.
- Salmon SA, Bryan KR y Coco G (2007) "The use of video systems to measure run-up on beaches." *Journal of Coastal Research*, Special Issue No 50, pp 211-215.
- S.Arcilla A, Rodríguez A, Bahía E, Redondo JM y Díez M. (1997 a) "Study of surf-zone mixing using video images." *International Conference Coastal Dynamics*, ASCE. RU.
- Sánchez-Arcilla A, Rodríguez A, Santás JC, Mösso C, Gracia V, Sospedra J, K'osyan R y Kuznetsov S. (1997 b) "Experimentos Hidro-morfodinámicos en la zona costera del Delta del Ebro." *IV Jornadas Españolas de Ingeniería de Puertos y Costas*, Cádiz.
- Sasaki T, Horikawa K y Hotta S. (1976) "Nearshore Current on a Gently Sloping Beach." *Proc. International Conference on Coastal Engineering*. ASCE, 36, 626-644.
- Sekula E y Redondo JM (2009) "The structure of turbulent jets, vortices and boundary layer: Laboratory and field observations." *Il nuovo cimento* Vol. 31 5-6 DOI 10.1393/ncc/i2009-10358
- Shuckburgh E, Jones H, Marshall J y Hill C. (2009) "Robustness of an effective diffusivity diagnostic in oceanic flows". *Journal of physical oceanography*. Vol 39.
- Sierra JP, Mösso C, Sánchez-Arcilla A, Rodríguez, A Redondo JM y Díez M (1998) *Caracterización del sistema de corrientes en la zona de surf mediante analisis de velocidades e imagenes de vídeo. Caso Delta'96*. Bangor

- Solanas, A (2002) "Biodegradación microbiana en la contaminación por hidrocarburos." *Mundo Científico*. Vol. 1 N° 8. Pp 913-920.
- Sonu C. (1969) "Tethered balloon for study of coastal dynamics." *American Society. Photogrametry., Tech.Rep.*, 66, 91-103.
- Sonu C. (1973) "Three-dimensional beach changes." *J.Geology*, 81, 42-64.
- Stommel, H (1949) "Horizontal diffusion due to oceanic turbulence." *Journal of Maritime Research*, 8 (3), 199-225.
- Stull RB. (1950) "An introduction to boundary layer meteorology." Ed. Klumer Academic Publishers.(1993) 3° de., pp 666.
- Tarquis AM, Platonov A, Matulka A, Grau J, Sekula E, Díez M y Redondo JM (2011) "Application of multifractal analysis to the study of SAR features and oil spills in the ocean surface." *Non-Linear Processes in Geophysics 2011*, npg-2010-123
- Taylor GI. (1931) "Diffusion by continuous movements." *Proc. of the London Math. Soc.* vol. 20, 196-212.
- Taylor GI. (1932) "The transport of vorticity and heat through fluids in turbulent motion." *Proc. Roy. Soc. A* 135, 685-705.
- Taylor GI (1935). *Statistical theory of turbulence*, I-IV. *Proc. R. Soc. London Ser. A* 151 : 421-78.
- Thornton EB. (1970) "Variation of Longshore Currents Across the Surf Zone." *Proc. Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE*, 12, 291-308.
- Thornton E. B. & Guza, R.T (1983)"Transformation of wave height distribution." *J. Geophys. Res.*, 88, 5925-5938.
- Tritton DJ. (1989) "Physical fluid dynamics." Oxford University Press.
- Tsubaki R y Fujita I. (2005) "Stereoscopic measurement of a fluctuating free surface with discontinuities." *Meas. Sci. Technol.* 16, 1894–1902.
- Turner JS. (1973) "Buoyancy Effects in Fluids" Cambridge Univ. Press.
- Von Karman T, Howarth L. (1938). "On the statistical theory of isotropic turbulence." *Proc. R. Soc. London Ser. A* 164: 192-215.
- Walton T. (1993) "Ocean City, Maryland, wave runup study." *Journal of Coastal Research*, 9, (1), 1-10.
- Wanek JM y Wu CH. (2006) "Automated trinocular stereo imaging system for 3D surface wave measurements." *Ocean Engineering* 33, 723–747.
- Wiegel RL. (1947) "Recognition of underwater obstructions from aerial photography." *Wave Proj. Rep. HE-116-248*, Univ of Calif., Berkeley , 32 pp.
- Yao A, Wu Ch. (2004) "An automated image-based technique for tracking sequential surface wave profiles." *Ocean Engineering* 32, 157–173.
- Zamora J. (2003) "La desgracia del Prestige" http://marenostrom.org/ecologia/medio_ambiente/prestige/desgracia3.htm
- Zeidler R. (1976) "Coastal dispersion of pollutants." *Journal of Waterways, Harbour and Coastal Engineering, ASCE*, vol. 102, ww2, 235-254.
- Zeidler R. (1978) "Sea turbulence spectrum." *Oceanologia*, N°9, pp. 161-179.
- Zipf GK (1949). "Human Behaviour and the Principle of Least Effort." 2nd edn Hafner Publishing Company. New York, reprinted 1972.

ANNEXO 1: TEORÍA DE LA TURBULENCIA.

A.1 INTRODUCCIÓN A LA TURBULENCIA

En dinámica de fluidos se clasifican los flujos entre laminares y turbulentos en función del número de Reynolds, según predominen las fuerzas inerciales o las viscosas. El fluido laminar sigue un comportamiento predecible, sin mezcla y con trayectorias lineales mientras que el flujo turbulento es aleatorio, formando remolinos y produce mezcla y difusión a un ritmo mucho mayor que en el caso laminar. Como ejemplo se ve en la figura A.1 de un flujo turbulento.

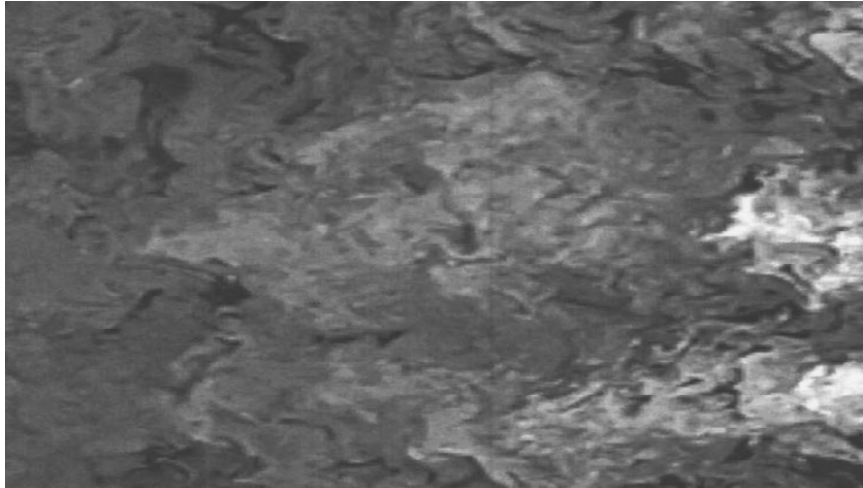


Figura A.1. Flujo turbulento.

Se entiende, de forma general, como **Turbulencia totalmente desarrollada** aquella turbulencia *isótropa y homogénea* donde el flujo presenta un estado de desorden caótico *con estructuras en todas las escalas* que aparece ante la vista como una estructura de trayectorias incoherentes pero uniforme en el espacio. Esta definición, usada en la teoría matemática de la turbulencia presenta algunas limitaciones en turbulencia geofísica donde la no-homogeneidad es importante.

Las ecuaciones de Navier-Stokes no pueden resolverse totalmente debido a la aparición de los tensores de Reynolds y a que siempre hay más incógnitas que ecuaciones, es decir presentan un problema de cierre, por lo que se recurre a simplificaciones, como por ejemplo, considerar.

- isotropía y homogeneidad, para poder trabajar con medias y fluctuaciones alrededor de esas medias, como. la aproximación de Boussinesq donde se disipan las fuerzas de inercia.
- que el flujo a distintas escalas está en equilibrio local.
- que tenemos un fluido barotrópico, la temperatura no interviene en la ecuación cinética de estado y la densidad y presión no producen vorticidad.

$$-\nabla p + \nabla \nu \nabla \bar{v} + \bar{b} = \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{v} \nabla \bar{v} \quad (\text{Ec. A-1})$$

Siendo p la presión termodinámica, ν es la viscosidad cinemática y b el vector que aglutina las fuerzas másicas

Para flujo incompresible, o sea que las ondas de presión viajan a velocidad infinita,

$$\nabla v = 0 \quad (\text{Ec. A-2})$$

Tenemos un sistema no-lineal de cuatro ecuaciones:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) v_x + b_x &= \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) & \text{(Ec. A-3)} \\ -\frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) v_y + b_y &= \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_y \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \\ -\frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) v_z + b_z &= \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_z \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} &= 0 \end{aligned}$$

Considerando que las fuerzas másicas son conservativas, y por lo tanto, su rotacional es nulo si obtiene la ecuación de la vorticidad, definida como el rotacional de la velocidad

$$\boldsymbol{\omega} = \text{rot}(\mathbf{v}) = \nabla \times \mathbf{v} \quad \text{(Ec. A-4)}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{\omega}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \boldsymbol{\omega} = (\boldsymbol{\omega} \cdot \nabla) \mathbf{v} + \nabla \nu \nabla \boldsymbol{\omega} \quad \text{(Ec. A-5)}$$

A.2 DESCRIPCIÓN INTEGRAL A DISTINTAS ESCALAS

La descripción global de una propiedad f en la escala L considerada, se denota por los corchetes y se define por

$$\langle f \rangle \equiv \frac{1}{L^3} \int_{B_L} f(\mathbf{r}) d\mathbf{r} \quad \text{(Ec. A-6)}$$

Es importante resaltar que no es exacto hablar de leyes de conservación cuando están aplicadas sobre una ecuación (la de *Navier-Stokes*) que es intrínsecamente disipativa desde un punto de vista conceptual y por tanto siempre debemos restringirnos a la escala de estudio y en situaciones de equilibrio (Frish, 1995). Tenemos entonces las siguientes ecuaciones de conservación.

$$\text{Conservación del momento:} \quad \frac{d}{dt} \langle \mathbf{v} \rangle = 0 \quad \text{(Ec. A-7)}$$

$$\text{Conservación de la energía:} \quad \frac{d}{dt} \left\langle \frac{1}{2} |\mathbf{v}|^2 \right\rangle = -\nu \langle |\boldsymbol{\omega}|^2 \rangle + \mathbf{F} \quad \text{(Ec. A-8)}$$

Conservación de la helicidad:

$$\frac{d}{dt} \left\langle \frac{1}{2} \mathbf{v} \cdot \boldsymbol{\omega} \right\rangle = -\nu \langle \boldsymbol{\omega} \cdot \nabla \times \boldsymbol{\omega} \rangle + \mathbf{F} \quad (\text{Ec. A-9})$$

donde el término \mathbf{F} representa las aportaciones de las fuerzas externas, de manera genérica. Para considerarse estrictamente leyes de conservación el término de forzaje \mathbf{F} debe compensar la disipación por la viscosidad, o bien tanto este término como la viscosidad del fluido sean nulas.

Esta claro que en caso de turbulencia medioambiental, a un número de Reynolds alto, estas condiciones no se cumplen, sin embargo es útil considerar los siguientes invariantes:

Energía

$$E \equiv \left\langle \frac{1}{2} |\mathbf{v}|^2 \right\rangle \quad (\text{Ec. A-10})$$

Enstrofia

$$\Omega \equiv \left\langle \frac{1}{2} |\boldsymbol{\omega}|^2 \right\rangle \quad (\text{Ec. A-11})$$

Helicidad

$$H \equiv \left\langle \frac{1}{2} \mathbf{v} \cdot \boldsymbol{\omega} \right\rangle \quad (\text{Ec. A-12})$$

Helicidad Vortical

$$H_{\omega} \equiv \left\langle \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega} \cdot \nabla \times \boldsymbol{\omega} \right\rangle \quad (\text{Ec. A-13})$$

La aplicación de esta notación permite escribir las leyes de conservación de la energía y la helicidad de la siguiente manera simplificada:

$$\frac{d}{dt} E = -2\nu\Omega \quad (\text{Ec. A-14})$$

$$\frac{d}{dt} H = -2\nu H_{\omega} \quad (\text{Ec. A-15})$$

Por último, se introduce la cantidad conocida y utilizada ampliamente en turbulencia como *disipación de la energía*, definida como

$$\varepsilon \equiv -\frac{dE}{dt} \quad (\text{Ec. A-16})$$

Estos conceptos se aplican a la turbulencia descomponiendo el campo de velocidades en las ecuaciones de gobierno del problema, mediante la aplicación de un operador denominado de *low-pass filtering*, definido como

$$P_K : f(\mathbf{r}) \mapsto f_K^<(\mathbf{r}) \quad (\text{Ec. A-17})$$

Si se aplica el operador a la ecuación de *Navier-Stokes* y a la de *continuidad*, y se descompone la velocidad según el parámetro K , se obtiene

$$-\nabla p_K^< + \nu \Delta \mathbf{v}_K^< + \mathbf{b}_K^< = \frac{\partial \mathbf{v}_K^<}{\partial t} + P_K^< \left((\mathbf{v}_K^< + \mathbf{v}_K^>) \cdot \nabla (\mathbf{v}_K^< + \mathbf{v}_K^>) \right) \quad (\text{Ec. A-18})$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v}_K^< = 0 \quad (\text{Ec. A-19})$$

Tomando el producto escalar de las anteriores con $\mathbf{v}_K^<$, considerando las medias y tras una serie de operaciones algebraicas, se deriva en una expresión para la variación de la energía asociada a las escalas de filtro *lowpass* de la velocidad. La importancia de esta expresión es que en ella no desaparece el término no lineal de las ecuaciones de gobierno, pudiendo ahora acometer una interpretación del mismo en el funcionamiento energético de la turbulencia. La expresión que se consigue es la siguiente, (Frish, 1995):

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left\langle \frac{1}{2} |\mathbf{v}_K^<|^2 \right\rangle + \left\langle \mathbf{v}_K^< \cdot [(\mathbf{v}_K^< + \mathbf{v}_K^>) \cdot \nabla (\mathbf{v}_K^< + \mathbf{v}_K^>)] \right\rangle \quad (\text{Ec. A-20}) \\ & = - \left\langle \mathbf{v}_K^< \cdot \nabla p_K^< \right\rangle + \nu \left\langle \mathbf{v}_K^< \cdot \Delta \mathbf{v}_K^< \right\rangle + \left\langle \mathbf{v}_K^< \cdot \mathbf{b}_K^< \right\rangle \end{aligned}$$

Desarrollando el término no lineal e introduciendo nueva notación, la expresión anterior puede resumirse como

$$\frac{\partial}{\partial t} \xi_K + \Pi_K = -2\nu\Omega_K + \mathbf{F}_K \quad (\text{Ec. A-21})$$

En la que los nuevos términos corresponden a

Energía acumulada entre los valores de número de onda ($K=2\pi/L$) 0 y k

$$\xi_K \equiv \frac{1}{2} \left\langle |\mathbf{v}_K^<|^2 \right\rangle = \frac{1}{2} \sum_{k \leq K} |\hat{\mathbf{v}}_k^<|^2 \quad (\text{Ec. A-22})$$

Enstrofía acumulada

$$\Omega_K \equiv \frac{1}{2} \left\langle |\boldsymbol{\omega}_K^<|^2 \right\rangle = \frac{1}{2} \sum_{k \leq K} k^2 |\hat{\mathbf{v}}_k^<|^2 \quad (\text{Ec. A-23})$$

Inyección de energía acumulada

$$\mathbf{F}_K \equiv \left\langle \mathbf{v}_K^< \cdot \mathbf{b}_K^< \right\rangle = \sum_{k \leq K} k^2 |\hat{\mathbf{v}}_k^<|^2 \quad (\text{Ec. A-24})$$

Flujo de energía a través de K

$$\Pi_K \equiv \left\langle \mathbf{v}_K^< \cdot (\mathbf{v}_K^< \cdot \nabla \mathbf{v}_K^>) \right\rangle + \left\langle \mathbf{v}_K^< \cdot (\mathbf{v}_K^> \cdot \nabla \mathbf{v}_K^>) \right\rangle \quad (\text{Ec. A-25})$$

Se puede proceder ahora a la interpretación conceptual del resultado. La expresión anterior nos indica que la variación en el tiempo de la energía de las escalas superiores a la escala correspondiente a k escogida es igual a la inyección de energía proveniente de las fuerzas aplicadas, menos la energía disipada por la viscosidad en ese rango de escalas, menos el trasvase de energía del rango de escalas considerado

hacia el rango de escalas inferiores (este es el término no lineal de la expresión). Este trasvase es el que da lugar al concepto de *cascada de energía*, básico en la comprensión de los mecanismos que gobiernan el fenómeno turbulento. También es importante darnos cuenta de la hipótesis de localidad, que no permite que la energía a una escala pase a otras muy distintas.

A.3 CASCADA DE ENERGÍA Y INTERMITENCIA

A.3.1 Cascada de energía

El modelo conceptual clásico fue establecido por Richardson en 1921. Si se analiza la energía respecto el número de onda se observan claramente tres zonas:

- Inicialmente la energía aumenta con el número de onda, generando oleaje y vorticidad, hasta que la turbulencia se desarrolla completamente. Por ello decimos que se inyecta energía al sistema.
- En una etapa intermedia se produce una transferencia de energía de las escalas mayores a las menores, se rompen los remolinos transformándose en otros menores mediante las interacciones no lineales. La idea básica es la existencia de esta jerarquía en la escala de los remolinos. Las fuerzas inerciales dominan sobre la viscosidad, y se produce la inyección de energía al sistema.
- Finalmente, esta turbulencia completamente desarrollada llega a una escala inferior, llamada de Kolmogorov, donde la disipación de energía está dominada por la disipación viscosa.

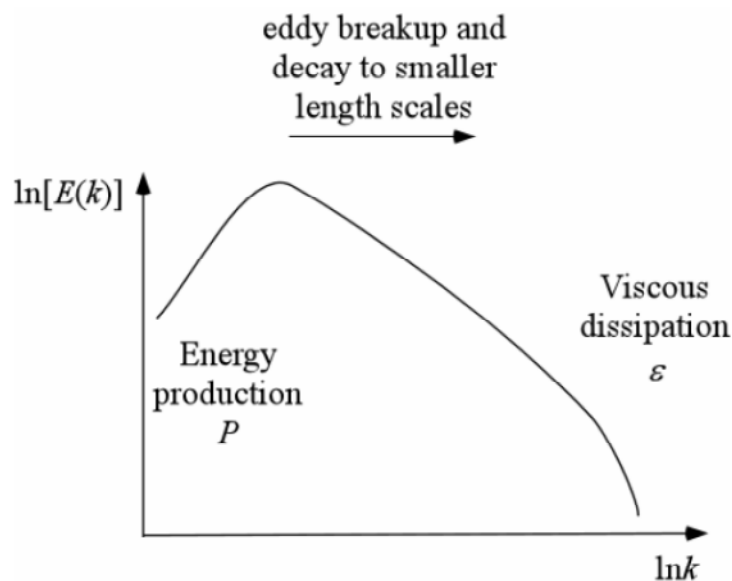


Figura A-3. Distribución de energía según el número de onda k .

A.3.2 Disipación viscosa

A partir del modelo sin intermitencia (Richardson 1922) Taylor estableció que la transferencia de energía desde las escalas superiores a las inferiores depende del cuadrado de la velocidad característica los remolinos de la escala superior y de su período característico (cociente de la velocidad característica y su escala característica, con dimensiones consistentes con la ec 1.16), del siguiente modo:

$$\varepsilon = C \frac{u^3}{\ell} \quad (\text{Ec. A-26})$$

Esta aproximación permite el cálculo de las transferencias de energía entre escalas partiendo de escalas donde la viscosidad juega un papel muy poco relevante, y suponiendo que no hay intermitencia y por tanto ε es constante a todas las escalas.

Sobre este razonamiento Kolmogorov en 1941 plantea que en un flujo turbulento totalmente desarrollado las características estadísticas del mismo tan sólo pueden depender de la viscosidad ν y de la tasa de disipación de energía por unidad de masa ε .

A.3.3 Rango inercial

Según la cascada de energía existe una escala característica, llamada escala de Kolmogorov, para la cual la viscosidad deja de ser relevante frente a las fuerzas inerciales, que a partir de un análisis dimensional propone como:

$$\eta_k \approx \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{1/4} \quad (\text{Ec. A-27})$$

Lo cual deja establecido un subrango inercial de energía turbulenta en cuyas escalas la viscosidad no es dominante y su efecto puede ser despreciado frente al de las fuerzas inerciales.

Esto permite discernir el número de onda k a través de los cuales entra la energía al sistema, partiendo de la escala mayor l , y terminando en la escala de Kolmogorov, donde se considera la disipación de la energía del sistema por medio de la viscosidad

$$l^{-1} < k < \eta_k^{-1} \quad (\text{Ec. A-28})$$

Una vez realizado este cálculo, este mismo análisis puede llevarse a efecto con otras variables para encontrar sus respectivos valores característicos de Kolmogorov. Así pues, pueden hallarse también tanto el período de tiempo característico como la velocidad característica asociados a la escala de Kolmogorov, que resultan en:

$$\tau_k \approx \left(\frac{\nu}{\varepsilon} \right)^{1/2} \quad (\text{Ec. A-29})$$

$$v_k \approx (\nu\varepsilon)^{1/4} \quad (\text{Ec. A-30})$$

La aplicación del análisis al espectro de energía, la cantidad de energía asociada a cada frecuencia o número de onda, a lo largo de toda la señal turbulenta, supone que como la energía contenida en el rango de escala inercial sólo puede ser dependiente de la tasa de disipación de energía por unidad de masa ϵ y de la escala en sí misma (el número de onda k), llegando a la expresión conocida universalmente como la ley de los $-5/3$ de Kolmogorov”

$$E(k) \approx C \cdot \epsilon^{2/3} \cdot k^{-5/3} \quad (\text{Ec. A-31})$$

A.3.4 Efecto del empuje (b)

En el caso de existir diferencias de densidad con capas de mezcla, se dan inestabilidades baroclinas donde claramente existe una no-homogeneidad local. Así que el razonamiento anterior debe modificarse, al menos añadiendo un nuevo concepto debido al empuje, que hace que no se pueda hacer la hipótesis de homogeneidad e isotropía.

Se define una capa de mezcla como aquella zona que, por la generación de inestabilidades, provoca una mezcla de sus propiedades, presentando una cierta homogeneidad dentro de un ámbito inicialmente estratificado. El límite de una capa de mezcla viene determinado por la zona donde pueden reconocerse gradientes elevados.

Las inestabilidades, por lo general turbulentas, que generan las capas de mezcla con estratificación, pueden clasificarse principalmente en los siguientes tipos:

- *Inestabilidad de Kevin-Helmholtz*, que es producida por gradientes de velocidad en una interfase de densidad. Las fuerzas inerciales son desestabilizadores y la densidad estabilizadora. La eficiencia suele ser baja o moderada.
- *Inestabilidad de Rayleigh-Taylor*, que se produce cuando dos fluidos de distinta densidad son acelerados uno contra otro. Por ejemplo en fluidos estratificados inestablemente, un fluido ligero bajo otro más denso, se generan flujos convectivos dominados por los empujes desestabilizadores, y la inercia y viscosidad son estabilizadores. Otro ejemplo es la inyección local de energía puntual, como la rotura de una onda interna contra la interfase. La eficiencia de la mezcla en este caso suele ser muy alta.
- *Inestabilidad de Holmboe*, que se producen cuando una inestabilidad local se mantiene en un entorno en el que la cizalladura no es dominante, generando ondas simétricas que pueden romper dando lugar a turbulencia y a mezcla local.
- Ruptura de Ondas Internas
- Penetración de Vórtices Bipolares.

Existen zonas paramétricas donde se dan casos intermedios, como los filamentos proyectados por ondas solitarias, a medio camino entre las Holmboe y las K-H (Redondo, 1990) y (Fraunie et al. 2008)

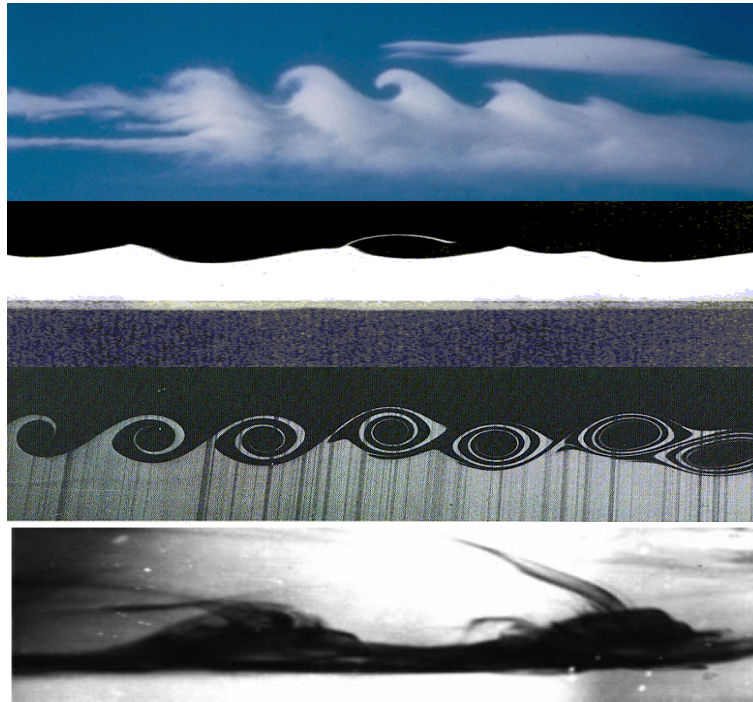


Figura A-4. Inestabilidades de densidad.

Los mecanismos de producción de inestabilidades turbulentas en el ámbito geofísico son muchos y variados, algunos de los cuales serían:

- Resonancia y ruptura de ondas internas
- Generación de vorticidad en ondas de sotavento
- Absorción de energía de cizalla por parte de flujos dominantes
- Doble difusión por diferencias de difusividad de la salinidad y temperatura
- Ascensión térmica por calentamiento del terreno
- Agitación superficie del mar debida al viento
- Otros...

El aparato teórico clásico que trata sobre la influencia de la estratificación en las dinámicas turbulentas y viceversa se basa en el análisis de una serie de parámetros adimensionales, denominados descriptores. Se analiza en lo sucesivo el carácter, relevancia y expresiones de estos números adimensionales (Ri , Ro , Ra , Sc ,...).

A.3.5 Definición de intermitencia

Al tener en cuenta todo el espacio, que no va a estar necesariamente lleno de energía, de forma uniforme a todas las escalas como en la hipótesis de homogeneidad y isotropía (figura A-2 izquierda), se introduce el concepto de la **intermitencia** de ocupación topológica del espacio de forma no uniforme (figura A-2 derecha).

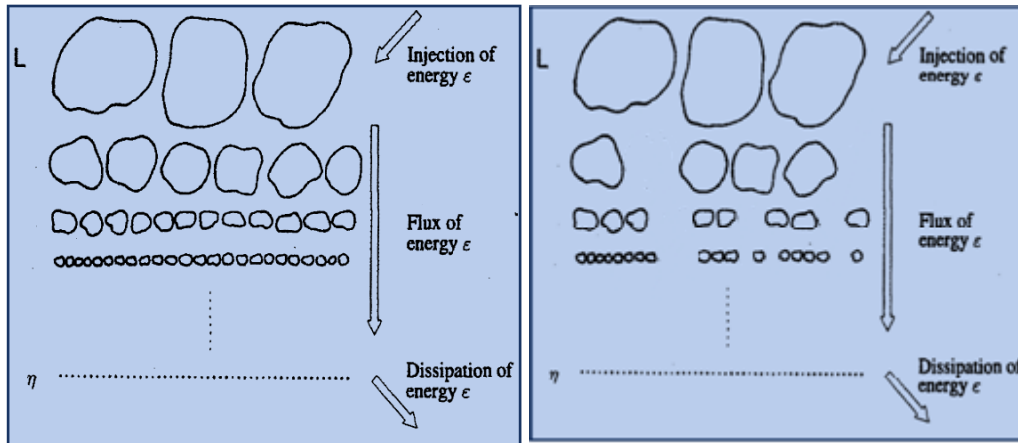


Figura A.2. Cascada del flujo de energía en distintas escalas asumiendo condiciones isotrópicas (izquierda) y con intermitencia (derecha).

A.3.6 Funciones de estructura

La función de estructura de la velocidad de orden p en el tiempo es:

$$S_p(\tau) = \langle |u(t + \tau) - u(t)|^p \rangle \tag{Ec A.32}$$

Y si se define espacialmente sería:

$$S_p(l) = \langle |u(x + l) - u(x)|^p \rangle \tag{Ec A.33}$$

Donde $\langle \rangle$ es el operador media y u es la componente de velocidad paralela a l. En la primera aproximación de Kolmogorov k41, para números de Reynolds altos, la función de estructura de la velocidad obedece en el rango inercial. Entre la escala integral y la escala de Kolmogorov tendremos de forma general :

$$S_p(l) = c \epsilon_0^{p/3} l^{p/3} \tag{Ec A.34}$$

Donde ϵ_0 es la media de la energía de disipación. Para turbulencia homogénea e isotrópica $\epsilon_0 = 15\nu \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2$ siendo ν la viscosidad cinemática.

Para el tercer orden de las funciones de estructura, en el rango inercial se obtiene la ley de Kolmogorov de los 4/5, $S_3(l) = -(4/5)\epsilon_0 l$

Como la disipación no tiene porqué ser constante a las distintas escalas, tal y como Landau criticó la teoría K41, el propio Kolmogorov introdujo una modificación suponiendo que hay una dependencia de la disipación con la escala de forma.

$$\varepsilon(\ell) \propto \langle \varepsilon_0 \rangle \ell^{\tau_p} \quad \text{Ec A.35}$$

donde $\varepsilon(\ell)$ es la media de la tasa de disipación de energía en un volumen de dimensión ℓ .

Aplicando esta dependencia de la disipación con la escala a una distribución no homogénea de la energía tenemos para la función de estructura de orden p

$$S_p(\ell) = c(p, \varepsilon_0) \langle \varepsilon_0 \rangle^{p/3} \ell^{\zeta_p} \quad \text{Ec A.36}$$

y ζ_p es el exponente de escala absoluto que incluye una dependencia espacial de ε_i y por tanto

$$\zeta_p = p/3 + \tau_p \quad \text{Ec A.37}$$

Como el exponente de Holden nos da la relación de escalas en la velocidad de forma $v(\ell) = c v(\eta_k) \ell^H$

Para escalas comprendidas entre la integral y la de Kolmogorov tenemos que $H = 1/3 - (3-D)/3$ de forma que la relación espectral modificada por la intermitencia será:

$$E(k) = c'(\varepsilon_0) k^{-\left(\frac{5}{3} + \frac{3-D}{3}\right)} \quad \text{Ec A.37}$$

Siendo la intermitencia para orden p , μ_p

$$\mu_p = (3-D)(1-p/3) \quad \text{Ec A.38}$$

y siguiendo a Sekula y Redondo (2008) se puede definir una intermitencia generalizada para los distintos ordenes de las funciones de estructura como:

$$\mu_p = 2\zeta_{p/2} - \zeta_p \quad \text{Ec A.39}$$

Estas definiciones de intermitencia coinciden con la utilizada usualmente para $p=6$, $\mu=2-\zeta_6$ o también para la intermitencia introducida por Frish $\mu'=4/3-\zeta_4$.

A.4 ANÁLISIS FRACTAL Y MULTIFRACTAL

A.4.1 Definición de dimensión fractal

La observación experimental de que las leyes de escala en la turbulencia dependen del tamaño llevó al uso de los modelos de fractal (Mandelbrot 1985) y multifractal de la turbulencia (Frisch, 1995). Relacionando los modelos espectrales (espacio de Fourier) con los geométricos (espacio fractal) surgió el concepto de la intermitencia.

Mandelbrot 1985 dio definiciones prácticas de la dimensión fractal de objetos reales, los objetos fractales, como una auto semejanza en un rango. La dimensión de Hausdorff se puede utilizar para describir los objetos físicos en una gama limitada, donde se puede aplicar autosimilitud, como en rango de la cascada de energía turbulenta entre la mayor escala y la de Kolmogorov.

La dimensión fractal D_i se define como:

$$D_i = \frac{\log N}{\log \left(\frac{1}{\sigma} \right)} \quad (\text{Ec. A-40})$$

donde N es el número de partes similares o cajas que cubren un tamaño σ .

A.4.2 Análisis multifractal

Una extensión de la dimensión fractal para un conjunto de isolíneas genera un conjunto de diferentes dimensiones fractales, de ahí su nombre de multifractal. Para una curva fractal, la L mide la longitud y tendrá una dependencia de la ley de potencia en el criterio de medición como:

$$L \propto \sigma^{1-D_i} \quad (\text{Ec. A-41})$$

El exponente D_i se llama la dimensión fractal de la curva y es una medida de la rugosidad según la fragmentación de la curva y tienen el subíndice $i = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ representa la dimensión euclidiana del espacio de incrustación. La convolución fractal de las interfaces incrementará el área entre las diferentes regiones marcadas del flujo. En forma similar al anterior se puede expresar el área determinada por el conjunto fractal como:

$$A \propto \sigma^{2-D_2} \quad (\text{Ec. A-42})$$

Si el rango de escalas donde hay auto-similitud está limitada por una escala mayor y una menor, como la de Kolmogorow η_k el incremento de la superficie A_i , de una interfaz de turbulencia debido al comportamiento fractal a escala l es

$$A_l \left(\left(\frac{l}{\eta} \right)^{2-D_2} - 1 \right) \quad (\text{Ec. A-43})$$

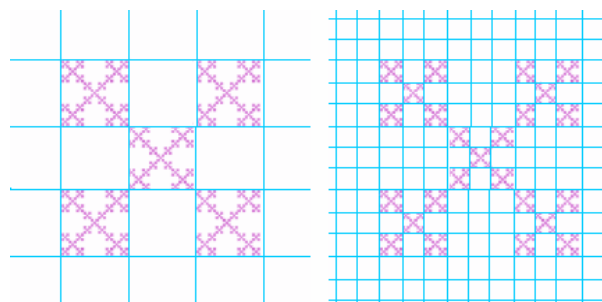
Este aumento de la superficie de contacto debe ser tenido en cuenta cuando se mezclan a través de interfaces de densidad. Este descriptor geométrico es útil en grandes dimensiones fractales, generalmente en flujos muy convolucionados. El análisis multifractal permite la parametrización de la eficiencia de mezcla de las inestabilidades básicas.

Por ejemplo, si se realiza un recuento de algoritmo de conteo de recuadros a la energía y los contornos de la vorticidad diferente de la turbulencia en descomposición de la estela de una interfaz (Redondo et al. 2009). Nos damos cuenta de que el flujo está dominado por vórtices cada vez menos considerados como estructuras coherentes y, al mismo tiempo, el espectro se vuelve más no-local (es decir, más pronunciada), la dimensión fractal disminuye a medida que cuenta Redondo (1990) y et Vassilicos et al.

A.4.3 El método BOX-COUNTING

El software de *Ima-Calc* se usa aquí para calcular la dimensión fractal de imágenes a través de un algoritmo de conteo de recuadros, BOX COUNTING. Además, incluye herramientas sencillas de procesamiento y análisis de imágenes.

Se considera cuadrícula de lado h y se cuenta el número de cajas que no están vacías. Cuanto menores son las cajas, más detalle, lo que es lo mismo que el aumento de la ampliación e , que es igual a $1/h$. La fórmula de la dimensión fractal es $D_f = \log n / \log e$. Si h es más pequeño, la dimensión será más precisa. Para 3-D fractales podemos hacer lo mismo con cubos en lugar de cuadrados, y para el 1-D fractales podemos usar segmentos de línea.



FiguraA-5. The Box-counting.

La dimensión fractal se puede relacionar con el espectro de frecuencias o el espectro espacial obtenido con la transformada de Fourier de funciones de correlación de tiempo o espaciales ya que el espectro de la dimensión fractal se puede derivar si el trazador es adveccionado pasivamente por un flujo turbulento. Así la dimensión fractal puede relacionarse con la energía de la turbulencia según una dependencia espacial o temporal, y el exponente del espectro de frecuencias, en un subrango inercial, es una función de la dimensión fractal de conteo de recuadros, según Redondo (1990).

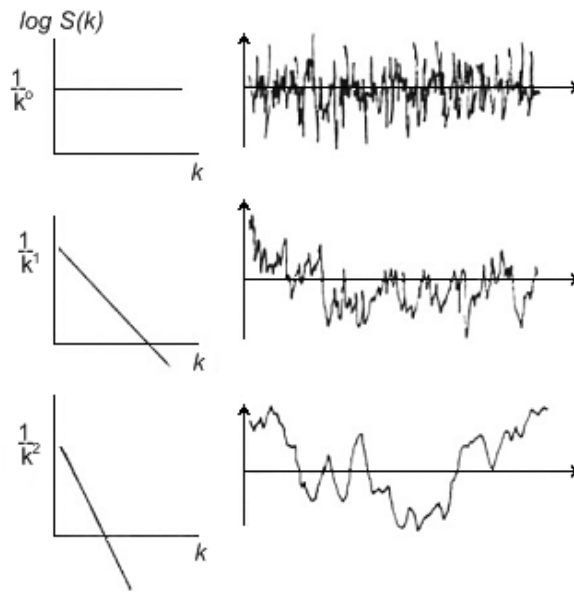


Figura A-6. Relación entre la pendiente del espectro y la señal.

En la figura A-6 podemos ver la dependencia entre la estructura de la señal y su espectro de Fourier, las tres señales que corresponden a ruidos (arriba), a movimiento browniano fraccional cercano a turbulencia (centro) y movimiento browniano suave (abajo). Los espectros más apuntados están dominados por el bajo número de onda (grandes olas) y las estructuras no-locales.

A.4.4 Función de densidad espectral

Si asumimos que el espectro de frecuencias tiene una forma bien definida en un rango importante de frecuencias, como $(E(k) \propto k^{-p})$

$$S(f) = f^{-p} \tag{Ec. A-44}$$

Utilizando la variación de la señal $\rho(t)$ se define a partir de:

$$V(T) = \langle (\rho(t+T) - \rho(t))^2 \rangle \tag{Ec. A45}$$

Donde $\langle \rangle$ es la media del periodo la dependencia fractal para series temporales $V(T) \approx T^{2H}$ la descripción de la función de densidad espectral S(f):

$$S(f) \approx T^p \tag{Ec. A-46}$$

$$S \propto T \int_0^T \rho^2(t) e^{-ift} dt \approx TV \tag{Ec. A-47}$$

por lo que

$$S(f) \approx TV \approx T^{2H+1} \approx T^{2E_u+1-2D} \tag{Ec. A-48}$$

Así la relación entre el exponente de la función de densidad espectral y la dimensión fractal es:

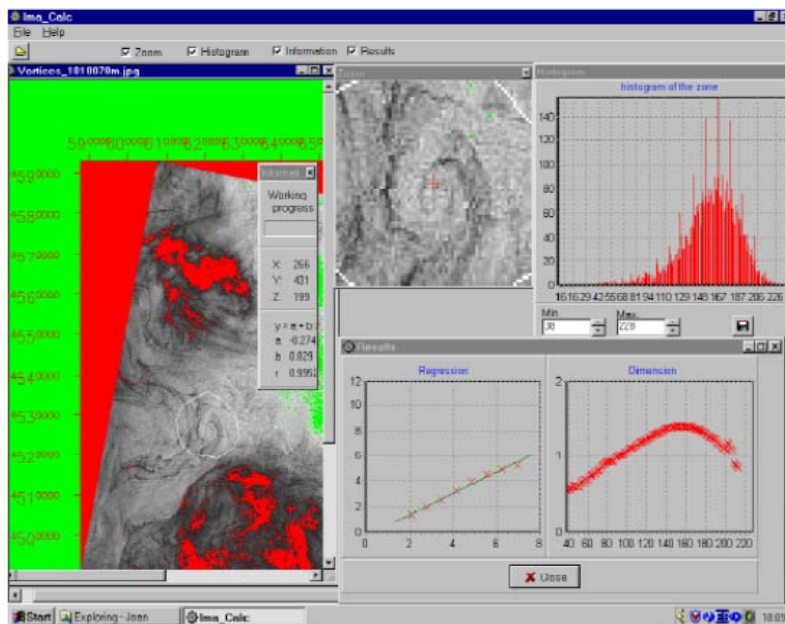
$$p = 2E_u + 1 - 2D_{E_u} \qquad D_{E_u} = E_u + \frac{1-p}{2} \tag{Ec. A-49}$$

Estas equivalencias geométrico-dinámicas pueden servir para verificar metodologías de cálculo de la dimensión fractal. El análisis multifractal da aún más información sobre el aumento de los niveles de intensidad diferentes de la imagen. Cada conjunto de valores da una propiedad de imagen, que en el caso de la imagen SAR indica la rugosidad de la superficie, de la temperatura en el caso de imágenes infrarrojas, o la concentración de un trazador.

Cada imagen tiene una dimensión fractal D_E en un espacio euclídeo E_u que expresa el nivel de auto-semejanza en el espacio. Para calcular la dimensión fractal máxima el método de conteo de recuadros que da cobertura del objeto y el método más simple es que la caracterizan con las cajas de lado e , cuadrados o cubos. La distribución sistemática muestra que tenemos cajas con una intersección o no, vacías.

$$D_{E_u}(i) = - \frac{\ln N(e,i)}{\ln e(i)} \tag{Ec. A-50}$$

Si obtenemos la dimensión fractal para cada nivel de intensidad se obtiene una caracterización multi-fractal de la característica en estudio. En la figura A-7 se muestra un análisis típico de la estructura multifractal de un vórtice con programa ImaCalc, Grau et al.



Descripción de un análisis multifractal de un vórtice con ImaCalc

A.4.5 Aplicación de análisis MultiFractal a contornos.

Las medidas multifractales son principalmente medidas de una distribución estadística por lo que los resultados proporcionan información útil, incluso si la estructura subyacente no muestra un comportamiento similar o afín sí mismo como lo demuestra Plotnick et al. Para un objeto mono-fractal, como se mencionó anteriormente, el número n de las características de un determinado tamaño δ varía como

$$N(\delta) \propto \delta^{-D_0} \quad , \quad (\text{Ec. A-51})$$

donde la dimensión fractal D_0

$$D_0 = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log N(\delta)}{\log \frac{1}{\delta}} \quad (\text{Ec. A-52})$$

puede medirse contando el número n de cajas necesarias para cubrir el objeto a investigar para aumentar tamaño de las cajas δ y la estimación de la pendiente de una gráfica log-log.

Existen varios métodos para la aplicación del análisis multifractal, usamos el del momento, que usa 3 funciones $\tau(q)$ la función de exponente de masa, α conocido como el exponente Hölder grueso y $f(\alpha)$ el espectro multifractal. Para que un campo en un soporte 2D de $L \times L$ píxeles de la imagen, μ (se puede considerar como el tono gris de 0 a 255 en una imagen de 8 bits), se podría descomponer espacialmente en términos de una infinidad de conjuntos entrelazados de las dimensiones fractales. En ese caso, una dimensión fractal no puede caracterizar toda la complejidad y varias dimensiones fractales se calcula en función de la posición.

Aplicando función de partición $\chi(q, \delta)$:

$$\chi(q, \delta) = \sum_{i=1}^{n(\delta)} \mu_i^q(\delta) = \sum_{i=1}^{n(\delta)} m_i^q \quad (\text{Ec. A-53})$$

Donde m es la masa de la medida, q es el exponente de la masa, δ el tamaño de la longitud de la caja y $n(\delta)$ el número de cajas. Sobre esta base, la función exponente de la masa $\tau(q)$ muestra cómo los momentos se escalan el tamaño de la caja:

$$\langle \tau(q) \rangle = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log \langle \chi(q, \delta) \rangle}{\log(\delta)} = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log \langle \sum_{i=1}^{n(\delta)} m_i^q \rangle}{\log(\delta)} \quad (\text{Ec. A-46})$$

donde $\langle \rangle$ representa momento estadístico de la medida, $\mu_i(\delta)$ definido en un grupo de cuadros no superpuestos del mismo tamaño de la partición del área estudiada D_q de manera que $\tau(q) = (1 - q)D_q$.

Esta caracterización de las medidas multifractales generalizada se corresponde a los exponentes de escala para el momento de la medida. Basado en el trabajo de Rényi (1955) se definen como:

$$D_q = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{1}{1-q} \frac{\log \sum_{i=1}^{n(\delta)} m_i^q}{\log \delta} \quad (\text{Ec. A-54})$$

El índice de singularidad α puede determinarse como la transformada de Legendre de la :

$$\langle \alpha(q) \rangle = \frac{d \langle \tau(q) \rangle}{dq} \quad (\text{Ec. A-55})$$

El número de células de tamaño δ con el mismo α se relaciona con el tamaño de la celda como $n_\alpha(\delta) \propto \delta^{-f(\alpha)}$ donde $f(\alpha)$ es un exponente de escala de las células con común α :

$$\langle f(\alpha) \rangle = q \langle \alpha(q) \rangle - \langle \tau(q) \rangle \quad (\text{Ec. A-56})$$

Espectro multifractal (MFS), una función $f(\alpha)$ caracteriza cuantitativamente la variabilidad de la medida estudiada. La asimetría de derecha y la izquierda indica el dominio de valores pequeños y grandes, respectivamente. El ancho del espectro de MF indica la variabilidad total.

MFA en imágenes 2-D consiste en dividir el plano en las cajas para la construcción de muestras con múltiples escalas. El método combina píxeles para formar cajas mayores mutuamente excluyentes de manera que cada juego contiene diferentes de píxeles. Si tenemos una imagen de $L \times L$ píxeles y se aplica una partición de cajas $\delta \times \delta$ entonces el número de cajas N de tamaño lineal seguirá la proporción:

$$N(\delta) \propto \left(\frac{L}{\delta} \right)^2, \quad (\text{Ec. A-57})$$

δ es mayor cuanto mayor sea el número de muestras necesarias para llevar a cabo un análisis estadístico de convergencia.

A.5 EFECTOS DE ESCALA

A.5.1 Análisis dimensional

Para comparar las escalas de la difusión molecular y turbulenta comparamos la difusión de un gas en una habitación con dimensión L . A partir de la ecuación de difusión se puede estimar el orden de magnitud de la diferencia de concentración C después de un tiempo T_m

$$\frac{\delta C}{T_m} \propto D \frac{\delta C}{L^2} \quad (\text{Ec. A-58})$$

Si la velocidad de los remolinos grandes en la sala es de u , la correspondiente escala de tiempo T_t se convierte en:

$$T_t = \frac{L}{u} \quad (\text{Ec. A-59})$$

La relación entre ambas para un coeficiente de difusión D para el aire y una viscosidad cinemática del aire ν del mismo orden de magnitud se puede expresar como:

$$\frac{T_t}{T_m} \propto \frac{L D}{u L^2} = \frac{D}{uL} \propto \frac{\nu}{uL} = \frac{1}{\text{Re}} \quad (\text{Ec. A-60})$$

El transporte turbulento por lo general es mucho más rápido que la difusión molecular. Si nos centramos en los remolinos más pequeños, ε la tasa de disipación de energía por unidad de masa tiene dimensión de $\frac{m^2}{s^3}$, y ν la viscosidad cinemática escala de Kolmogorov de longitud η_k , el tiempo T y velocidad u

$$\eta_k = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{1/4}, T = \left(\frac{\nu}{\varepsilon} \right)^{1/2}, u = (\nu \varepsilon)^{1/4} \quad (\text{Ec. A-61})$$

El número de Reynolds en esta escala demuestra que la viscosidad domina los procesos de esta envergadura.

$$\text{Re} = \frac{u \eta_k}{\nu} = 1 \quad (\text{Ec. A-62})$$

Los grandes remolinos con la longitud y la velocidad de las escalas l y u pierden su energía cuando se han recorrido una distancia del orden de l . El tiempo asociado es l/u . La energía cinética de una unidad de masa es del orden de u^2 , por lo que la energía que una unidad de masa pierde por segundo es u^3/l . En promedio, este debe ser igual a la tasa de ε con los remolinos más pequeños se están disipando su energía cinética inicial,

$$\varepsilon = \frac{u^3}{l} \quad (\text{Ec. A-63})$$

Entonces la relación entre el tamaño de los remolinos pequeños y grandes es

$$\frac{\eta_k}{l} = \left(\frac{\nu^3}{u^3 l^3} \right)^{1/4} = \text{Re}^{-3/4} \quad (\text{Ec. A-64})$$

Con números de Reynolds en el orden de $\text{Re} \approx 10^4$, las escalas de longitud difieren en un orden de 10^3 . Los cálculos numéricos deberían calcular ambos remolinos a la vez, lo que de momento no es posible. Una relación similar se mantiene para las escalas de tiempo:

$$\frac{\tau}{t} = \frac{\tau}{l/u} = \text{Re}^{-1/4} \quad (\text{Ec. A-65})$$

Las velocidades angulares de los remolinos son inversamente proporcionales a las escalas de tiempo. Lo que supone que hay más de disipación de energía en las escalas más pequeñas.

A.5.2 Simplificaciones dimensionales de Navier-Stokes

Incluso los flujos turbulentos son considerados correctamente modelados por simulación numérica directa (DNS) de las ecuaciones de Navier-Stokes (NS) y las ecuaciones de continuidad, que son la simplificación de las leyes de Newton aplicada a un fluido. De hecho contienen simetrías espacio-temporales que no son evidentes a primera vista. La ecuación de NS de forma general es:

$$\partial_t \vec{v} + \vec{v} \nabla \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla \vec{p} + \nu \nabla^2 \vec{v} + \vec{F} \quad (\text{Ec. A-66})$$

donde v es la velocidad, p la presión, F las fuerzas del másicas, ρ la densidad y ν la viscosidad cinemática. Si se introduce un factor de escala λ elevado al exponente H (llamado el factor o el exponente de Hurst (Hurst, 1956), en el campo de velocidades se puede estudiar el comportamiento del sistema bajo las siguientes transformaciones que surgen de un simple cambio de escala

$$v \rightarrow \lambda^H v' \quad (\text{Ec. A-67})$$

$$t \rightarrow \lambda^{1-H} T' \quad (\text{Ec. A-68})$$

$$r \rightarrow \lambda r' \quad (\text{Ec. A-69})$$

$$p \rightarrow \lambda^{2H} p' \quad (\text{Ec. A-70})$$

$$F \rightarrow \lambda^{2H-1} F' \quad (\text{Ec. A-71})$$

Si tenemos en cuenta en la ecuación 5.29, el escalado de las coordenadas en un flujo no viscoso $\nu=0$, la ecuación de Euler queda:

$$\lambda^{2H-1} [\partial_T v + v \nabla v + \nabla p] = 0 \quad (\text{Ec. A-72})$$

la ecuación de Euler se comporta de la misma manera a escalas que la viscosidad tiende a cero. Para ver si esta simetría se conserva cuando la viscosidad está presente, podemos estudiar la siguiente hipótesis:

A) $\nu \rightarrow \lambda^{H+1} \nu$ La viscosidad se escala con otras variables.

B) $\nu = \text{cte}$. La viscosidad es constante a todas las escalas.

hipótesis A) satisface la invariancia de escala para cada valor H , mientras que la hipótesis B) sólo es válida para $H=-1$ Esta simetría se debe a la ley de conservación de la circulación del campo de velocidades. De acuerdo con el principio de la auto-similitud de la ecuación de NS, hay un flujo de energía de una escala a otra hasta que la escala de Kolmogorov, la escala de longitud en la que la disipación viscosa es igual a la disipación de de energía y es el límite inferior para la transferencia de energía. Podemos estudiar la ecuación NS aplicando operadores de proyección cuya función es la de un filtro de paso alto / bajo. De este modo, la ecuación resultante:
Variación de energía + flujo de energía = enstrofía + inyección de energía:

A.5.3 Interpretación física

Se puede interpretar como que la tasa de cambio de la energía a escala hasta una cierta longitud es igual a la energía inyectada a una escala por una fuerza menos la energía disipada en tales escalas y menos el flujo de energía a escalas más pequeñas. Este último término se debe a interacciones no lineales entre las escalas derivadas del término no lineal en la ecuación de NS. Este término no lineal es el responsable de la conducta imprevisible de los flujos turbulentos.

También podemos hacer una interpretación escalar de la ecuación de la difusión y la ecuación de vorticidad asumiendo un término de producción de escalar G y una producción de vorticidad baroclina J

$$J = \frac{1}{\rho^2} \nabla \rho \times \nabla p \tag{Ec. A-73}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = G - (u \cdot \nabla) \rho - D \nabla^2 \rho \tag{Ec. A-74}$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = J - (u \cdot \nabla) \omega + [(\omega + 2\Omega) \cdot \nabla] - \nu_\omega \nabla^2 \omega \tag{Ec. A-75}$$

Podemos escalar.

$$\begin{aligned} r &\rightarrow \lambda r', \dots \dots \dots v \rightarrow \lambda^H v', \dots \dots \dots t \rightarrow \lambda^{1-H} t', \dots \dots \dots \rho \rightarrow \lambda^H \rho', \\ D &\rightarrow \lambda^{H+1} D', \dots \dots p \rightarrow \lambda^0 p', \dots \dots \dots f \rightarrow \lambda^{2H-1} f', \dots \dots G \rightarrow \lambda^{H+H} G' \end{aligned} \tag{Ec. A-76}$$

Sin embargo, para escalar la vorticidad tenemos que considerar la hipótesis A) y B), y generalizar un poco las leyes de similitud para incluir derivadas, integrales, o en general el mayor orden de momentos de escala de otra manera, así que usando la definición de orden qas funciones de estructura en el tiempo $S_q(z) = \langle |u(t+\tau) - u(t)|^q \rangle$

queda: $S_q(z) = C_q \tau^{\xi(q)}$ (Ec. A-77)

exponente de Hurst (Hurst, 1956) generalizado para un orden q se define como:

$$H(q) = \frac{\xi(q)}{q} \tag{Ec. A-78}$$

Para la segunda función de estructura, al igual que la correlación escala la variación de la ecuación A-45 tenemos:

$$u = \lambda^{2H(2)} \tag{Ec. A-79}$$

y para el exponente menor

$$p = 2H(2) + 1 \tag{Ec. A-80}$$

como se menciona en las ecuaciones 5.16 y 5.17, se da una relación entre vorticidad y velocidad:

$$\omega = \vec{\nabla} \times \vec{u} \quad (\text{Ec. A-81})$$

Su comportamiento no es el de un escalar pasivo (Zauri y Babiano 1994) y su escalado no será la misma para $\rho = \lambda^H \rho'$ ni $u = \lambda^H u'$.

En el caso más sencillo usando $[\omega] \equiv T^{-1}$, con una constante $v = v_\omega$

$$\omega = \lambda^{H-1} \omega' \quad (\text{Ec. A-82})$$

Si queremos aplicar esta escala, a la evolución del tamaño del vórtice, sería interesante comparar los espectros con el exponente de Hurst de segundo orden. Según (Tarquis et al. 2009) si $H(2)=1/3$ el exponente de potencia es $p=5/3$ de manera similar para la cascada de enstrofía Kraichnan 2D donde $p=3$ y entonces $H_{2D}(2)=1$.

Si utilizamos la máxima dimensión fractal como Redondo (1990, 1996) la ecuación A-49 queda.

$$p = 2E_u + 1 - 2D_{E_u} \quad (\text{Ec. A-83})$$

para los flujos 3D $p=7-2D_3$ y para flujos 2D $p=5-2D_2$. Así que si $p=5/3$ en un flujo totalmente $D_3=2,66$ y si $p=3$ $D_2=1$. Si en el espectro Kolomogorov $p=5/3$ aparece en un flujo 2D entonces $D_2=1,66$. Ambos tipos de flujos pueden coexistir tanto en la atmósfera y el océano como lo indica Platonov et al. (2008). El papel de la intermitencia daría otros valores.

A.5.4 Aplicación de análisis multifractal

En la figura A.8 se muestra el calculo multifractal utilizando ImaCalc de una mancha de crudo en este caso la distribución de intensidades en la imagen no es continua, tradicionalmente solo se utiliza la dimensión fractal máxima para un determinado nivel de gris en la imagen.

La energía por unidad de masa asociada con el movimiento a la escala de l , respecto la escala integral o mayor escla de referencia l_0 es:

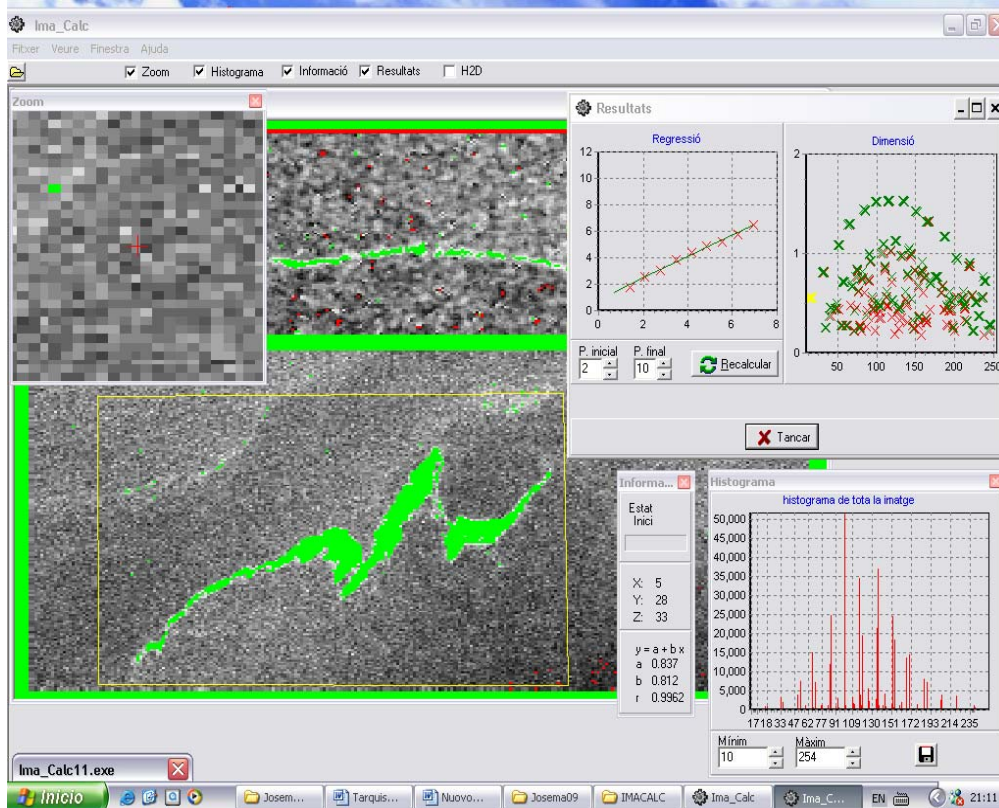
$$E_l \approx v_l^2 \left(\frac{l}{l_0} \right)^{3-D} \quad (\text{Ec. A-84})$$

El flujo de energía Π'_l desde escalas l , a pequeñas escalas es E_l/t_l . Así,

$$\Pi'_l \approx \frac{v_l^3}{l} \left(\frac{l}{l_0} \right)^{3-D} \quad (\text{Ec. A-85})$$

Asumimos usualmente que para altos números de Reynolds, hay un rango inercial en el que el flujo de energía es independiente de l :

$$\Pi_l' \approx \varepsilon \approx \frac{v_0^3}{l_0} \quad (\text{Ec. A-86})$$



Descripción de un análisis multifractal de un vórtice con ImaCalc

Una consecuencia de la expresión anterior, cuando $l \rightarrow l_0$, y v_0 es la velocidad característica a la escala l_0 , es la siguiente:

$$v_l \approx v_0 \left(\frac{l}{l_0} \right)^{\frac{1}{3} \frac{3-D}{3}} \quad (\text{Ec. A-87})$$

$$t_l \approx \frac{l}{v_l} \approx \frac{l_0}{v_0} \left(\frac{l}{l_0} \right)^{\frac{2}{3} + \frac{3-D}{3}} \quad (\text{Ec. A-88})$$

La ecuación anterior puede ser vista como la afirmación que el campo de velocidad tiene el exponente escalar

$$H = \frac{1}{3} - \frac{3-D}{3} \quad (\text{Ec. A-89})$$

En la serie ζ de dimensión fractal D , en la cual la cascada se acumula. Esta nueva formulación será útil para la generalización a multifractales.

Pasamos ahora a las funciones de la estructura. A nivel fenomenológico, es difícil distinguir entre las funciones de la estructura longitudinal y los relacionados con otros

componentes. Estando aquí, debemos evitar tales distinciones y simplemente indicar la función de la estructura de orden p de $\langle \delta v_p^l \rangle$.

Hay dos contribuciones a esta cantidad, un factor v_p^l , procedente de los remolinos activos y un factor de intermitencia

$$p_l = (l/l_0)^{3-D}$$

ocupado por los remolinos activos de escala l . Utilizando la expresión anterior, obtenemos:

$$S_p(l) = \langle \delta v_l^p \rangle \approx v_0^p \left(\frac{l}{l_0} \right)^{\zeta_p} \quad (\text{Ec. A-90})$$

Con

$$\zeta_p = \frac{p}{3} + (3-D)\left(1 - \frac{p}{3}\right) \quad (\text{Ec. A-91})$$

Se ve que para el modelo β , el exponente ζ_p es una función lineal y constante de orden p . Hay que tener en cuenta que para $p = 6$ la diferencia de valor de la teoría K41 es igual a la codimensión 3-D.

Para $p=2$, encontramos que el segundo orden de la función de la estructura tiene el exponente $2/3+(3-D)/3$; por lo tanto, el espectro de energía en el rango inercial, satisface:

$$E(k) \propto k^{-\left(\frac{5+3-D}{3}\right)} \quad (\text{Ec. A-92})$$

Que es más abrupta que la del espectro de Kolmogorov-Obukhov $k^{-5/3}$. Para $p=3$, obtenemos $\zeta_3=1$, como requerimiento de la ley cuatro quintos de Kolmogorov.

El punto de corte viscoso para el modelo β se obtiene igualando el tiempo de rotación de Foucault t_f y la difusión viscosa. Esto da la siguiente escala de disipación

$$\eta \approx l_0 R^{-\frac{3}{1+D}} \approx l_0 R^{-\frac{1}{1+H}} \quad (\text{Ec. A-93})$$

Desde el punto de vista multifractal, procedemos a derivar la expresión para la función de estructura de orden p .

$$\frac{S_p(l)}{v_0^p} \equiv \frac{\langle \delta v_l^p \rangle}{v_0^p} \approx \int d\mu(H) \left(\frac{l}{l_0} \right)^{ph+3-D(H)} \quad (\text{Ec. A-85})$$

Aquí, la medida $d\mu(H)$ nos da el peso de los diferentes exponentes. El factor $(l/l_0)^{pH}$ es la contribución de la expresión anterior y el factor $(l/l_0)^{3-D(H)}$ es la probabilidad de estar dentro de una distancia l , de la serie ζ_h de dimensión $D(H)$.

Los pesos $d\mu(H)$ han desaparecido de las expresiones asintóticas de las funciones de la estructura. Más libremente, si ignoramos las correcciones logarítmicas, podemos escribir:

$$\frac{S_p(l)}{v_0^p} \approx \left(\frac{l}{l_0}\right)^{\zeta_p}, l \rightarrow 0. \quad (\text{Ec. A-94})$$

Para la ley 4/5 de Kolmogorov, el exponente para la función de estructura de tercer orden debe de ser la unidad.

$$\zeta_3 = \inf_H [3H + 3 - D(H)] = 1 \quad (\text{Ec. A-95})$$

En relaciones anteriores entre la dimensión $D(H)$ y el exponente de función de estructura ζ_p reconocemos la transformada de Legendre. La cantidad ζ_p es la máxima distancia vertical registrada entre el gráfico del espectro multifractal $D(H)$ y la línea que atraviesa el origen de pendiente p . Si $D(H)$ tiene derivadas no crecientes, es decir, es cóncava, entonces para un valor dado de p , el máximo se alcanza en el único valor $H_*(p)$ tal que:

$$D'(H(p)) = p \quad (\text{Ec. A-96})$$

Y ζ_p es dado por

$$\zeta_p = pH(p) + 3 - D(H(p)). \quad (\text{Ec. A-97})$$

Si la invertimos, obtenemos:

$$D(H) = \inf_p (pH + 3 - \zeta_p). \quad (\text{Ec. A-98})$$

A partir de las expresiones anteriores, obtenemos:

$$\frac{d\zeta_p}{dp} = H(p) + [p - D'(H(p))] \frac{dH(p)}{dp} = H(p) \quad (\text{Ec. A-99})$$

Hay que tener en cuenta que, incluso si $D(H)$ no es cóncava, la transformación de Legendre ζ_p definida por las expresiones anteriores puede ser cóncava. La inversión de la fórmula anterior, puede en principio ser usada para extraer la función $D(H)$ a partir de datos experimentales o numéricos sobre los exponentes ζ_p . En la práctica no es un buen condicionante para la operación de datos porque la pendiente de la gráfica no está bien determinada, a excepción de pequeños valores de p en el que está muy cerca de 1/3 con $D(h)$ muy cerca a 3; que son por supuesto los valores de K41 tal como demuestra Frish 1995.