

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS Y TÉCNICAS
DEL AGUA Y DEL MEDIO AMBIENTE**

TESIS DOCTORAL

**DESARROLLO E INTEGRACIÓN DE
MODELOS NUMÉRICOS DE CALIDAD
DEL AGUA EN UN SISTEMA DE
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

AUTORA

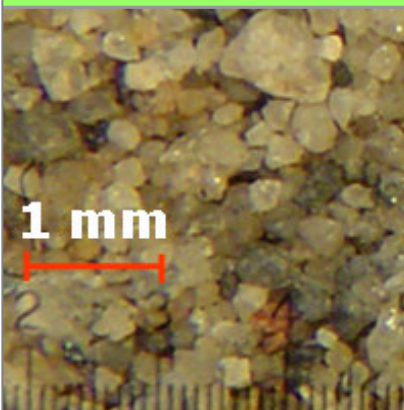
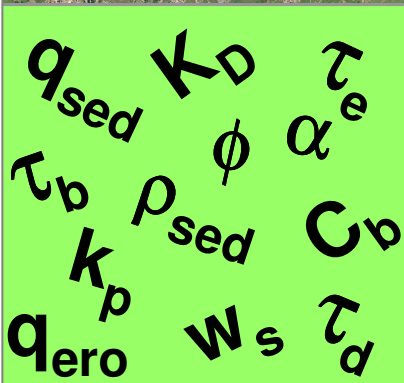
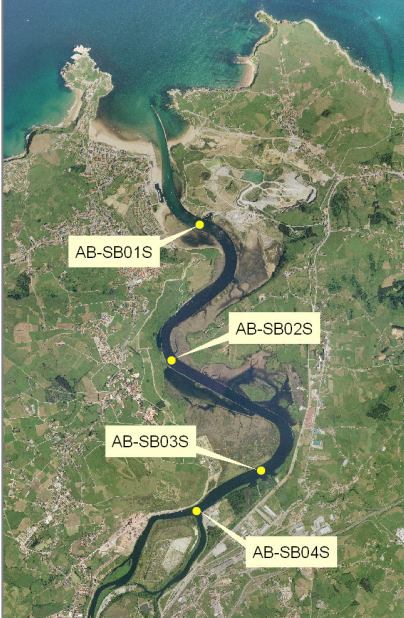
María Luisa Sámano Celorio

DIRECTORES

Andrés García Gómez

José Antonio Revilla Cortezón

Santander, 2011



6. APLICACIÓN DEL MODELO DESARROLLADO A LA RÍA DE HUELVA

Este capítulo ha sido dedicado a la descripción de la metodología seguida para llevar a cabo la aplicación del modelo desarrollado para el análisis de sustancias contaminantes considerando las interacciones que presentan con los sólidos en suspensión en otro caso real enclavado en la Ría de Huelva (concretamente en la zona portuaria), pero de problemática distinta al analizado en el capítulo anterior.

Cabe comentar que el Puerto de Huelva ha formado parte del grupo piloto para la validación y calibración de la ROM 5.1 relativa a la calidad de aguas litorales en áreas portuarias. Por tal motivo, para este caso de estudio, se ha estimado oportuno presentar tres aproximaciones distintas basadas en la consideración de una sustancia contaminante como:

- i) Compuesto conservativo, en referencia a la propuesta original de la ROM 5.1 (Puertos del Estado, 2005) (modelo conservativo)
- ii) Compuesto no conservativo, a la luz de los resultados obtenidos tras las calibración y validación de la ROM 5.1 (IH-Cantabria , 2011) (segundo módulo del modelo desarrollado) y
- iii) Compuesto no conservativo tomando en cuenta la interacción que experimenta con la materia en suspensión y el sedimento (tercer módulo del modelo desarrollado).

Para poder llevar a cabo esta última aproximación, la información disponible (tanto de las presiones, como de la calidad del medio) no resulta tan cuantiosa como sería deseable, por tal motivo no ha sido posible calibrar los parámetros sedimentarios correspondientes a esta zona en particular. Por ello, se han utilizado parámetros genéricos que, si bien son capaces de representar, en términos generales, la realidad física de la zona, se desconoce el nivel de precisión con que pueden hacerlo. No obstante, a pesar de esta limitación, es posible observar diferencias significativas con respecto a los resultados obtenidos a través de las otras dos aproximaciones en cuanto a una mejor representación de la realidad se refiere.

6.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Los Ríos Odiel y Tinto, localizados en el extremo sur-occidental de la Península Ibérica, además de estar considerados como zonas protegidas por albergar Lugares de Importancia Comunitaria (LICs) y Zonas de Especial Protección para Aves (ZEPAs), presentan la particularidad de que en sus tramos finales juntan sus aguas para formar el denominado Canal del Padre Santo que desemboca en el Océano Atlántico. El conjunto formado por los estuarios de ambos Ríos y el Canal recibe el nombre de Ría de Huelva.

El Río Odiel (Figura 6-1) nace en la Sierra de Aracena (Huelva), siendo su curso alto de fuerte pendiente, cauce estrecho y albergando pequeños embalses que satisfacen las necesidades hídricas de la importante actividad minera de la zona. En su tramo medio recibe las aguas de los Ríos Oraque, su afluente más importante, y Meca. Llega después a Gibraleón donde adquiere las características de estuario. A continuación, se divide en múltiples brazos que originan extensas islas fluviales (Bacuta, Enmedio y Saltés). Tras 107 Km de recorrido y 2300 Km² de superficie drenada, llega finalmente a su confluencia con el Río Tinto, aportando un volumen medio anual de 405 Hm³ (Usero et al., 2004).

Por su parte, el Río Tinto (Figura 6-1) nace en la Villa de la Granada, de la unión de un conjunto de arroyos con la rivera de Jaramilla. Recibe su verdadero nombre a partir de la confluencia de dicha rivera con el Río Agrío, originado en las minas de río Tinto (Huelva). Debe su denominación al color rojizo de sus aguas en una zona con importantes yacimientos de piratas. Su curso superior, sumamente abrupto, corre en dirección sur pasando por Berrocal. Recibe después por su derecha al Valverde y por su izquierda al Corumbel, que es su afluente más importante. A continuación toma definitivamente dirección sureste, pasa por la población de Niebla y, en las

inmediaciones de la Lucena, se transforma en estuario. A partir de ahí pasa por San Juan del Puerto dejando a su izquierda a Moguer y Palos del Frontera, para finalmente unirse con el Odiel, cerca del Monasterio de La Rábida, tras 92 Km de recorrido y 1680 Km² de superficie drenada, que le proporcionan un volumen medio anual de 160 Hm³ (Usero et al., 2004).

Finalmente, bajo el nombre de Canal del Padre Santo (Figura 6-1) se conoce un amplio estuario, formado tras la confluencia de los Ríos Tinto y Odiel. Este canal se extiende en dirección sureste, con una longitud aproximada de 13 Km, hasta desembocar en el Océano Atlántico, en la Playa de Mazagón (Huelva).



Figura 6-1. Toponimia de las inmediaciones de la zona de estudio.

Las cuencas de estos ríos atraviesan una zona de importante actividad minera denominada "Cinturón Pirítico Ibérico", en la que se encuentran localizados un gran número de yacimientos. Aunque la mayoría de ellos no están actualmente en explotación, las actividades mineras generan, además de vertidos hídricos cargados de metales, un elevado volumen de materiales de desecho que pueden contaminar los ecosistemas acuáticos por efecto de erosión y escorrentías mucho tiempo después de haber dejado de estar activas las minas.

Los principales contaminantes procedentes de las actividades mineras son además de los metales (hierro, cobre, plomo, zinc, arsénico, mercurio, etc.) la acidez generada por diversas reacciones, la cual, a su vez, favorece la solubilidad de los compuestos metálicos en el medio acuático. Así pues, en la Ría de Huelva, las aguas más alejadas del mar son fuertemente ácidas debido, fundamentalmente, a los vertidos mineros y a la erosión de terrenos piríticos. No obstante, al descender por el cauce de los estuarios, como consecuencia de la mayor influencia del agua marina, se observa, además del propio efecto de dilución, un notable incremento del pH. Esto último provoca una importante precipitación de metales, lo cual, se ve reflejado en una disminución de las concentraciones en el agua a la par del aumento de las concentraciones en los sedimentos.

Por su parte, en términos de actividad industrial (Figura 6-2), en el entorno de la Ría de Huelva existen importantes instalaciones que se concentran, fundamentalmente, en tres polígonos: i) en la margen izquierda del Canal del Padre Santo (factorías petroquímicas, fabricación de cloro, sosa, óxidos de titanio y amoniaco-urea); ii) en la margen izquierda del estuario del Odiel (fabricación de ácido fosfórico, fertilizantes, ácido sulfúrico, etc.) y; iii) en la margen derecha del estuario del Tinto (fabricación de pasta de celulosa y de envasado y producción de acetileno).



Figura 6-2. Asentamiento de la actividad industrial en la Ría de Huelva.

Asimismo, a lo largo de esta Ría, se encuentra asentado el Puerto de Huelva, puerto de gran actividad y crecimiento que ocupa el 8º puesto entre los 28 puertos de titularidad estatal (por detrás de los puertos de Algeciras, Valencia, Barcelona, Bilbao, Tarragona, Las Palmas y Cartagena y antecediendo a los puertos de Gijón y Santa Cruz de Tenerife) de acuerdo con el informe generado por Puertos de Estado para el año 2008. Cuenta con más de diez muelles comerciales y de pesca empleados para el manejo de mercancías generales convencionales, graneles sólidos y líquidos, reparación y desguace de barcos, entre otros. Además del motor que representa el mineral, el Puerto de Huelva es, y ha sido, uno de los más importantes puertos pesqueros españoles y un importante núcleo de concentración de industrias químicas (p.e. Air Liquide, Algry, Aragonesas, Atlantic Copper, CEPSA, Enagas, Endesa, Repsol, etc.).

Para poder llevar cabo toda esta actividad la gran extensión de la zona de servicio terrestre alberga varios muelles localizados, mayoritariamente, en la margen izquierda del Odiel donde se concentra la actividad portuaria. En esta zona, se asientan también pantalanes para el manejo de graneles líquidos, una zona de depósitos, un puerto deportivo y el dique de abrigo. En contrapartida, la margen derecha de esta Ría está básicamente destinada al uso de protección de ribera.

A fin de poder aplicar el modelo SOLTOX a esta zona en particular, ha sido necesaria la construcción de una malla que integra los datos batimétricos de la zona exterior (obtenidos de las cartas náuticas 441 y 442 del Instituto Hidrográfico de la Marina) y de la zona interior (obtenidos a partir de la información proporcionada por la Autoridad Portuaria de Huelva sobre la relación de batimetrías registrada durante los trabajos de dragado periódico que se realizan para mantener el calado en la Ría). De este modo, la batimetría resultante se ha representado mediante una malla con una inclinación de 115º con respecto al norte de 600x800 celdas de 50 metros de lado (Figura 6-3 izq.) que cubre el litoral próximo al puerto de Huelva, así como tramos de los Ríos Tinto y Odiel a fin de integrar su influencia en los procesos de transporte que se lleven a cabo en la zona de estudio. Cabe mencionar que dicha malla, al igual que las condiciones hidrodinámicas de la zona, han sido debidamente calibradas en estudios previos (Sámano, 2007; IH Cantabria, 2010a). No obstante, cabe mencionar que, los estudios de transporte para los casos planteados se han llevado a cabo con una malla que abarca una menor extensión geográfica de 311x536 celdas para la que se ha mantenido el tamaño de celda e inclinación de la malla original (Figura 6-3 dcha.). Esta malla ajustada cubre, holgadamente, la zona portuaria y permite reducir el tiempo de cálculo a niveles operativos.

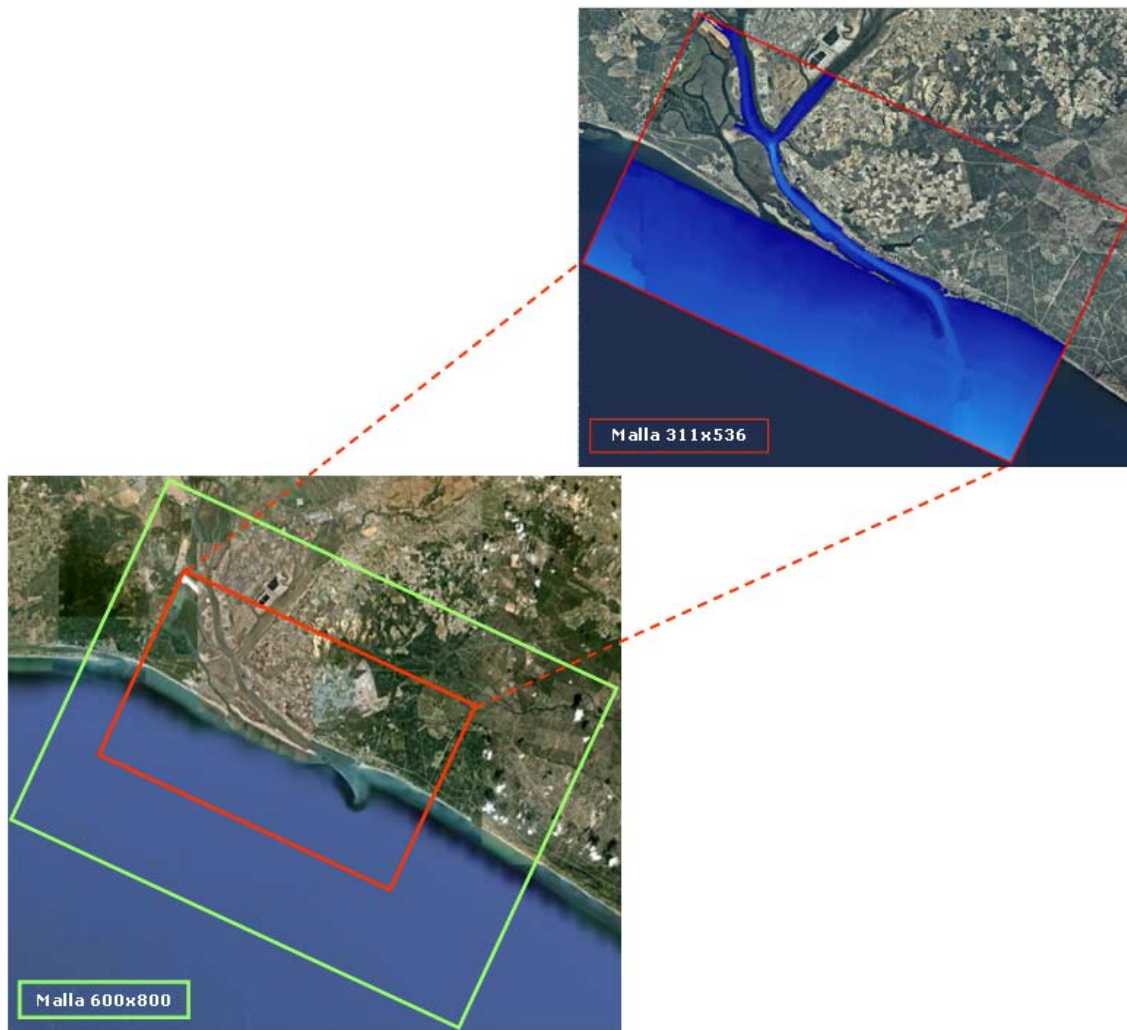


Figura 6-3. Zona de estudio y batimetría general de la Ría de Huelva.

6.2. SÍNTESIS DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE SOBRE LA ZONA DE ESTUDIO

Al igual que en el caso anterior, para poder llevar a cabo la validación del modelo desarrollado resulta fundamental contar con la caracterización de los vertidos presentes en la zona de estudio así como con datos de campañas que reflejen la calidad del medio. Por tal motivo, se ha llevado a cabo una minuciosa búsqueda de información al respecto. Como fruto de esta tarea se ha obtenido información pública procedente de las Autorizaciones Ambientales Integradas (AAI) de las empresas que vierten a la Ría de Huelva y datos de la calidad del medio pertenecientes a la

Asociación de Industrias Químicas Básicas de Huelva. La totalidad de esta información queda sintetizada a continuación.

6.2.1. Presiones existentes

De acuerdo con la información disponible en la página web de la Consejería de Medio Ambiente de Andalucía, dentro de la zona de estudio, se ha otorgado la correspondiente AAI a las siguientes empresas: Atlantic Copper, Endesa, Fertiberia, Foret, Nilefos Química (antigua Rhodia), Tioxide Europe, Decal España y Aragonesa Industria y Energía. La información general con respecto a la localización, tipo y cuantía de los vertidos autorizados para dichas empresas queda recogida en la Tabla 6-1 y en la Figura 6-4.

Empresa	Tipo de vertido	X UTM30	Y UTM30	Caudal (m ³ /año)
Aragonesa Industria y Energía*	Aguas industriales	152070	4121939	300000
Atlantic Copper	Aguas de refrigeración	149716	4127581	60000000
Atlantic Copper	Aguas industriales	149713	4127586	195000
Atlantic Copper*	Aguas residuales urbanas	149713	4127586	35000000
Decal España*	Aguas industriales	153929	4120111	287000
Endesa*	Aguas industriales	149945	4125989	100000
Fertiberia Huelva*	Aguas industriales	149505	4127159	1000000
Foret*	Aguas de refrigeración	149171	4128596	11000000
Nilefos Química	Aguas industriales	149272	4128115	6000
Tioxide Europe	Aguas industriales	153206	4120749	2575000

* Coordenadas aproximadas

Tabla 6-1. Localización y magnitud de los vertidos generados por las empresas autorizadas a verter en la Ría de Huelva.



Figura 6-4. Vertidos significativos a la Ría de Huelva.

Por su parte, los valores medios mensuales establecidos como los límites de vertido autorizados para cada parámetro quedan asentados en la Tabla 6-2. Cabe mencionar que al igual que en el caso anterior, a pesar de que las AAI también hacen alusión a algunos otros parámetros, la caracterización que se presenta a continuación se centra en los parámetros susceptibles de ser modelados.

Empresa	Tipo de vertido	SS (mg/l)	Cadmio (mg/l)	Cobre (mg/l)	Mercurio (mg/l)	Níquel (mg/l)	Plomo (mg/l)	Zinc mg/l
Aragonesa Industria y Energía	Industrial	150	-	-	0.05	-	-	1.0
Atlantic Copper	Industrial	250	0.200	0.5	0.02	1.15	0.50	3.0
Atlantic Copper	Urbano	35	0.020	0.1	-	-	-	0.5
Decal España	Industrial	250	-	-	-	-	-	-
Endesa	Industrial	150	-	-	-	-	-	-
Fertiberia Huelva	Industrial	20	0.200	0.5	-	-	-	3.0
Foret	Refrig.	-	0.003	-	-	-	-	-
Nilefos Química	Industrial	300	0.030	0.2	-	0.30	0.20	0.1
Tioxide Europe	Industrial	200	-	-	0.01	-	0.03	0.2

Tabla 6-2. Límites de vertido autorizados para distintas empresas en la Ría de Huelva.

Asimismo, ha de tenerse en consideración, tal y como se ha comentado, que los aportes provenientes de los Ríos Tinto y Odiel resultan mucho más significativos, en magnitud, que los de las empresas asentadas en esta zona (Tabla 6-3).

Aportes metálicos* (Tm/año)	2001	2002	2003	2004	2005
De origen industrial	2.93	2.47	2.35	2.31	2.14
Provenientes del Río Odiel	7000	5800	3800	7900	9630
Provenientes del Río Tinto	4500	6000	3700	3600	4474

*Metales: Cobre, Zinc, Cadmio, Arsénico y Mercurio

Tabla 6-3. Evolución de los aportes metálicos industriales y de los Ríos Tinto y Odiel a la Ría de Huelva (AIQB, 2005).

Por tal motivo, resulta fundamental conocer el comportamiento de ambos ríos a lo largo del año. No obstante, la obtención de dicha información no resulta una labor sencilla. Por ello, ha sido necesario recurrir a ciertas suposiciones que han conducido a una aproximación global coincidente, en términos de orden de magnitud, con el caudal medio anual. De este modo, puede asumirse que la distribución mensual de caudales establecida para los Ríos Tinto y Odiel es igualmente válida. A continuación se detallan las suposiciones adoptadas.

Tal y como puede observarse en las Tablas 6-4 y 6-5, los caudales de ambos ríos presentan ostensibles variaciones a lo largo del año, por tal motivo, ha sido necesario realizar un ajuste de los datos disponibles para poder establecer un caudal medio anual.

De acuerdo con la Confederación Hidrográfica del Guadiana, las aportaciones naturales mensuales de la zona 9 se corresponden con los caudales de los Ríos Piedras, Tinto y Odiel. A fin de poder evaluar en qué

proporción contribuye cada uno de ellos, se ha hecho una estimación con base en la superficie de cuenca. La zona 9 en conjunto tiene una superficie de cuenca de 4,652 km² (CHG, 2001), de la cual los Ríos Piedras, Tinto y Odiel ocupan un 12, 37 y 51% (CHG, 2005), respectivamente. Una vez separadas las aportaciones de cada río, se compararon y contrastaron los resultados a fin de establecer los datos no disponibles y poder calcular así un caudal medio (Tabla 6-5).

Año	Mes	Río Tinto (Hm ³)	Río Odiel (Hm ³)
2002	Febrero	0.4	3.2
	Marzo	4.9	17.4
	Abril	7.4	73.9
	Mayo	0.4	2.2
	Junio	0.0	0.5
	Julio	0.0	0.0
	Agosto	0.0	0.0
	Septiembre	-	-
	Octubre	-	-
	Noviembre	-	-
	Diciembre	-	-
	2003	Enero	7.2
Febrero		7.6	77.3
Marzo		7.8	48.5
Abril		4.7	47.0
Mayo		0.5	5.3
Junio		0.1	3.4
Julio		-	-
Agosto		-	-
Septiembre		-	-
Octubre		-	-
Noviembre		-	63.22
Diciembre		-	65.43
2004		Enero	-

Tabla 6-4. Datos mensuales de caudal en régimen real correspondientes al período comprendido entre Febrero 2002 y Enero 2004 (Nieto, 2004).

Mes	Zona 9 (Hm ³)	Río Piedras (12%)	Río Tinto (37%)	Río Odiel (51%)
Octubre	84.9	10.2	31.4	43.3
Noviembre	120.6	14.5	44.6	61.5
Diciembre	138.7	16.6	51.3	70.8
Enero	139.8	16.8	51.7	71.3
Febrero	126.9	15.2	46.9	64.7
Marzo	119.5	14.3	44.2	61.0
Abril	85.2	10.2	31.5	43.4
Mayo	58.9	7.1	21.8	30.0
Junio	32.0	3.8	11.8	16.3
Julio	8.0	1.0	2.9	4.1
Agosto	3.6	0.4	1.3	1.8
Septiembre	25.0	3.0	9.3	12.8
ANUAL	943.2	113.2	349.0	481.0

Tabla 6-5. Aportaciones naturales de la zona 9 (Ríos Piedras, Odiel y Tinto) de la Confederación Hidrográfica del Guadiana (CHG, 2001; CHG, 2005).

De este modo, combinando la información de las tablas anteriores, ha sido posible la obtención de una media aritmética mensual que se corresponde con el caudal medio mensual aproximado de los aportes fluviales provenientes de los ríos Tinto y Odiel tal y como se muestra en la Tabla 6-6. Así pues, el resultado final ha sido un valor de caudal medio anual de 191.1 Hm³ (15.9 Hm³/mes) para el Río Tinto y de 433.2 Hm³ (36.1 Hm³/mes) para el Río Odiel. Cabe recordar que de acuerdo con Usero et al. (2004) los aportes medios anuales de los Ríos Tinto y Odiel se corresponden con un volumen de 160 y 405 Hm³, respectivamente.

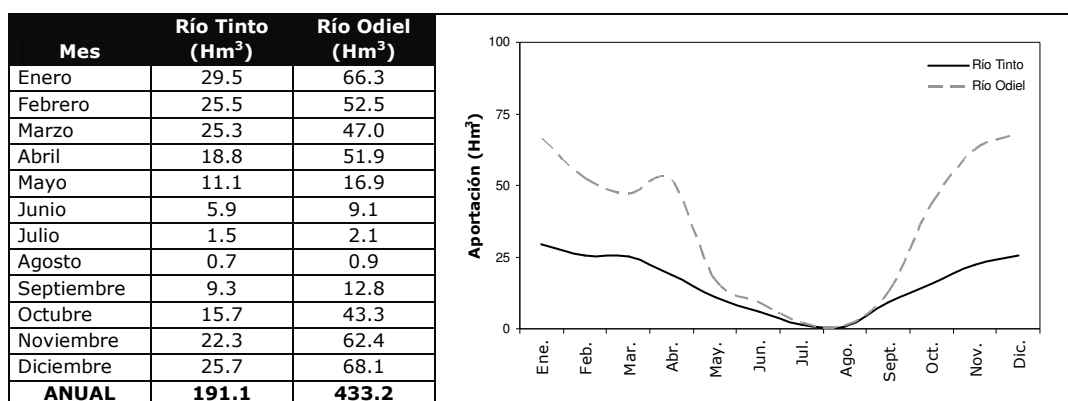


Tabla 6-6. Aportación media mensual aproximada de los ríos Tinto y Odiel.

6.2.2. Calidad del medio

Desde hace ya algunos años, la calidad de la Ría de Huelva se ha venido supervisando tanto por la Consejería de Medio Ambiente de Andalucía (como parte del llamado Plan de Policía) como por la AIQB (Asociación de Industrias Químicas y Básicas de Huelva).

De la totalidad de puntos de muestreo que conforman la red de vigilancia del **Plan de Policía de la CMA** de Andalucía, 22 quedan ubicados dentro de la zona de estudio, es por ello que su localización se presenta a continuación (Tabla 6-7 y Figura 6-5). Desafortunadamente, los informes de dicha Consejería presentan los datos obtenidos a través de valores medios y extremos (Tablas 6-8 y 6-10). No obstante, si bien no es posible conocer la calidad del medio de manera puntual, si resulta factible establecer dicha calidad en tres zonas bien diferenciadas: Río Tinto, Río Odiel y Canal del Padre Santo.

UTM30 X	UTM30 Y	Estación	Localización
147812.6	4144633.2	OD350	Gibraleón
148455.5	4132025.5	OD390	Huelva (Ctra. Huelva - Punta Umbria)
149010.8	4128665.9	OD420	Frente a Foret
149632.4	4126237.7	OD430	Puerto del Club Marítimo
149036.9	4127746.5	OD460	Puerto de Fertiberia (Fosfórico)
174745.9	4141887.1	TI190	Cruce con la Ctra. N-431
160836.0	4136965.7	TI230	Cruce con la Ctra. San Juan del Puerto-Moguer
153800.5	4129393.4	TI250	Aguas arriba de la confluencia con el estero del Rincón
152315.4	4128103.0	TI270	Confluencia con el estero del Rincón
151145.7	4125910.7	TI290	Próximo al Muelle de la Reina (La Rábida)
150599.5	4125337.2	CP010	Punta del Sebo
150377.3	4124947.8	CP020	Pantalán de petroleros de Torre Arenillas
150417.2	4124398.7	CP030	Muelle de minerales de Torre Arenillas
150626.4	4123894.3	CP040	Aguas abajo del muelle de Torre Arenillas
151104.2	4122769.0	CP050	Muelle Ing. Juan Gonzalo
151559.7	4122277.6	CP060	Aguas abajo del muelle Ing. Juan Gonzalo
152051.1	4121750.2	CP070	Pantalán de Almagrera
152422.7	4121330.7	CP090	Aguas abajo del Pantalán de Enagas
153369.5	4120467.7	CP110	Boya No. 19
155130.2	4118968.1	CP140	Boya No. 15
157317.3	4117719.5	CP160	Muelle del Vigía
160606.1	4115350.3	CP180	Desembocadura del Canal del Padre Santo

Tabla 6-7. Localización de las estaciones de muestreo del Plan de Policía de la CMA de Andalucía (Usero et. al, 2004) coincidentes con la zona de estudio.



Figura 6-5. Puntos de muestreo del Plan de Policía de la CMA de Andalucía.

Medio Pelágico

	Parámetro	Máximo	Mínimo	Medio
RÍO ODIEL	Cobre ($\mu\text{g/l}$)	12200	4	1220
	Zinc ($\mu\text{g/l}$)	40100	29	3560
	Níquel ($\mu\text{g/l}$)	398	<1	43
	Cromo (VI) ($\mu\text{g/l}$)	67	<1	4.5
	Cadmio ($\mu\text{g/l}$)	136	0.5	16
	Plomo ($\mu\text{g/l}$)	186	<5	18
	Arsénico ($\mu\text{g/l}$)	62	0.3	10
	Mercurio ($\mu\text{g/l}$)	0.6	<0.1	0.11
	pH	8.2	2.4	6.6
	SS (mg/l)	66	2	26
RÍO TINTO	Cobre ($\mu\text{g/l}$)	365000	17	14980
	Zinc ($\mu\text{g/l}$)	591000	33	30000
	Níquel ($\mu\text{g/l}$)	17400	<1	382
	Cromo (VI) ($\mu\text{g/l}$)	202	<1	25
	Cadmio ($\mu\text{g/l}$)	5130	0.5	163
	Plomo ($\mu\text{g/l}$)	987	<5	72
	Arsénico ($\mu\text{g/l}$)	28000	0.3	602
	Mercurio ($\mu\text{g/l}$)	0.2	<0.1	<0.1
	pH	8.2	1.9	5
	SS (mg/l)	682	1	60
CANAL DEL PADRE SANTO	Cobre ($\mu\text{g/l}$)	357	5	35
	Zinc ($\mu\text{g/l}$)	1170	15	176
	Níquel ($\mu\text{g/l}$)	16	<1	3.2
	Cromo (VI) ($\mu\text{g/l}$)	<1	<1	<1
	Cadmio ($\mu\text{g/l}$)	8.8	<0.5	1.9
	Plomo ($\mu\text{g/l}$)	12	<5	5.1
	Arsénico ($\mu\text{g/l}$)	44	1.1	12
	Mercurio ($\mu\text{g/l}$)	0.5	<0.1	0.1
	pH	8.3	6.9	7.9

Tabla 6-8. Valores máximos, mínimos y medios determinados en las aguas de la Ría de Huelva entre los años 1999 y 2003 (Usero et. al, 2004).

	Parámetro	1999	2000	2001	2002	2003
RÍO ODIEL	Cobre ($\mu\text{g/l}$)	1790	1580	1140	935	836
	Zinc ($\mu\text{g/l}$)	5360	4300	4170	2360	1980
	Níquel ($\mu\text{g/l}$)	59	53	47	33	28
	Cromo (VI) ($\mu\text{g/l}$)	7.3	5.4	4.8	2	3.3
	Cadmio ($\mu\text{g/l}$)	22	18	16	13	11
	Plomo ($\mu\text{g/l}$)	27	24	23	12	7.1
	Arsénico ($\mu\text{g/l}$)	20	8.5	7	8.4	6.9
	Mercurio ($\mu\text{g/l}$)	<0.1	<0.1	0.13	<0.1	0.1
	pH	6.7	6.5	6.5	6.8	6.6
	SS (mg/l)	28	20	27	22	30
RÍO TINTO	Cobre ($\mu\text{g/l}$)	11300	58200	12100	9000	5860
	Zinc ($\mu\text{g/l}$)	32800	105000	24600	17000	8000
	Níquel ($\mu\text{g/l}$)	154	2441	181	105	58
	Cromo (VI) ($\mu\text{g/l}$)	32	51	23	14	16
	Cadmio ($\mu\text{g/l}$)	103	783	105	79	53
	Plomo ($\mu\text{g/l}$)	98	55	121	71	34
	Arsénico ($\mu\text{g/l}$)	710	3060	186	273	7.3
	Mercurio ($\mu\text{g/l}$)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.11
	pH	5	4.7	4.5	5.2	5.3
	SS (mg/l)	104	53	51	45	46
CANAL DEL PADRE SANTO	Cobre ($\mu\text{g/l}$)	21	21	53	18	56
	Zinc ($\mu\text{g/l}$)	155	147	270	88	205
	Níquel ($\mu\text{g/l}$)	3.2	5.1	3.5	1.8	3.2
	Cromo (VI) ($\mu\text{g/l}$)	<1	<1	<1	<1	<1
	Cadmio ($\mu\text{g/l}$)	1.4	1.5	2.7	1.6	2.1
	Plomo ($\mu\text{g/l}$)	5.2	<5	5.1	5.1	5
	Arsénico ($\mu\text{g/l}$)	17	11	9	12	9
	Mercurio ($\mu\text{g/l}$)	<0.1	0.1	<0.1	<0.1	0.11
	pH	7.9	7.8	7.8	8	7.9

Tabla 6-9. Evolución temporal de los valores medios registrados en aguas de la Ría de Huelva entre los años 1999 y 2003 (Usero et. al, 2004).

Medio Bentónico

	Parámetro	Máximo	Mínimo	Medio
RÍO ODIEL	Cobre (mg/Kg)	3180	418	1573
	Zinc (mg/Kg)	3910	485	2434
	Níquel (mg/Kg)	51	15	29
	Cromo (mg/Kg)	432	53	162
	Cadmio (mg/Kg)	41	<0.5	8.4
	Plomo (mg/Kg)	2100	118	611
	Arsénico (mg/Kg)	929	104	501
	Mercurio (mg/Kg)	19	2.1	6.1
RÍO TINTO	Cobre (mg/Kg)	2260	372	1120
	Zinc (mg/Kg)	4230	366	1710
	Níquel (mg/Kg)	63	4	23
	Cromo (mg/Kg)	118	28	74
	Cadmio (mg/Kg)	13	0.8	4.1
	Plomo (mg/Kg)	1600	418	888
	Arsénico (mg/Kg)	1630	387	766
	Mercurio (mg/Kg)	6.2	0.7	3.5
CANAL DEL PADRE SANTO	Cobre (mg/Kg)	3240	512	1740
	Zinc (mg/Kg)	8320	834	3000
	Níquel (mg/Kg)	78	17	28
	Cromo (mg/Kg)	148	62	97
	Cadmio (mg/Kg)	6.1	0.5	2.2
	Plomo (mg/Kg)	2080	270	644
	Arsénico (mg/Kg)	991	186	468
	Mercurio (mg/Kg)	12	0.6	3.7

Tabla 6-10. Valores máximos, mínimos y medios determinados en los sedimentos de la Ría de Huelva entre los años 1999 y 2003 (Usero et. al, 2004).

	Parámetro	1999	2000	2001	2002	2003
RÍO ODIEL	Cobre (mg/Kg)	815	1630	1810	1690	1910
	Zinc (mg/Kg)	1540	2760	2750	2690	2520
	Níquel (mg/Kg)	30	27	28	32	31
	Cromo (mg/Kg)	135	125	214	184	152
	Cadmio (mg/Kg)	9.4	4.6	13.2	10.6	4.3
	Plomo (mg/Kg)	462	633	823	611	524
	Arsénico (mg/Kg)	325	514	562	625	479
	Mercurio (mg/Kg)	6.7	7.1	7.1	5.6	3.8
RÍO TINTO	Cobre (mg/Kg)	662	1350	1160	1310	1500
	Zinc (mg/Kg)	1170	2160	1690	1840	2020
	Níquel (mg/Kg)	24	27	20	20	24
	Cromo (mg/Kg)	61	77	80	76	84
	Cadmio (mg/Kg)	2.7	5	3.8	4.9	3.5
	Plomo (mg/Kg)	864	1040	677	977	981
	Arsénico (mg/Kg)	618	902	694	849	982
	Mercurio (mg/Kg)	3.3	4.7	2.9	3.2	3.5
CANAL DEL PADRE SANTO	Cobre (mg/Kg)	1220	1910	2020	1770	1780
	Zinc (mg/Kg)	2440	3060	3560	2930	2770
	Níquel (mg/Kg)	30	22	28	28	31
	Cromo (mg/Kg)	94	102	96	97	94
	Cadmio (mg/Kg)	2.9	2.4	2.4	2.2	1.3
	Plomo (mg/Kg)	662	594	736	703	527
	Arsénico (mg/Kg)	469	380	483	539	470
	Mercurio (mg/Kg)	4.4	4.4	4.2	3.6	2.1

Tabla 6-11. Evolución temporal de los valores medios registrados en los sedimentos de la Ría de Huelva entre los años 1999 y 2003 (Usero et. al, 2004).

De acuerdo con las determinaciones llevadas a cabo como parte del denominado Plan de Policía, tal y como puede observarse en la Tabla 6-9, la tendencia general evidencia un patrón de disminución de la concentración de metales pesados en la columna de agua con el transcurso de los años en ambos ríos, sin embargo, esta tendencia no es tan clara en el Canal del Padre Santo. Para el caso de los sedimentos, no se observa una tendencia generalizada tan clara (Tabla 6-11). Algunos parámetros como el Arsénico o el Cobre se incrementan conforme transcurre el tiempo. En contrapartida, algunos otros tales como: el Cadmio, el Cromo o el Mercurio, después de experimentar una concentración máxima, ven disminuido el valor de su concentración en los años posteriores. Finalmente, cabe comentar que, en términos generales, los elementos más abundantes se corresponden con: Zinc, Cobre, Plomo y Arsénico.

Esta información se presenta de forma gráfica en las Figuras 6-6 a la 6-8. No obstante, cabe resaltar que la disparidad en los órdenes de magnitud entre algunos de los parámetros determinados en el medio pelágico, han obligado al uso de distintas unidades (en algunos casos basta con $\mu\text{g/l}$, mientras que en otros, debido a su abundancia, es necesario el uso de mg/l). Por tal motivo, es preciso tener en cuenta esta consideración a fin de lograr una adecuada lectura e interpretación de estos gráficos. De este modo, en el eje de las ordenadas debe leerse tanto el orden de magnitud como la unidad correspondiente.

Tal y como puede observarse en el siguiente gráfico (Figura 6-6), los metales que se presentan con mayor abundancia en las aguas del Río Odiel son el zinc y el cobre que alcanzan valores de varios mg/l . Muy por debajo (en el orden de decenas de $\mu\text{g/l}$) se encuentran presentes, en orden decreciente: níquel, plomo, cadmio, arsénico, cromo y mercurio. Por su parte, el medio bentónico presenta también los mayores contenidos metálicos en forma de zinc y cobre, seguidos de plomo, arsénico y cromo. Resultan destacables las bajas concentraciones de níquel y cadmio detectadas en el medio bentónico puesto que dichos metales están presentes en concentraciones significativas en la columna de agua. Esto puede atribuirse al bajo coeficiente de partición de dichos metales ($3.98\text{E}+04$ y $5.01\text{E}+04$, respectivamente) en comparación con los correspondientes a otros como el zinc ($1.26\text{E}+05$), por ejemplo, que se encuentra en cantidades significativas en el lecho bentónico de la zona. Asimismo, podría ser consecuencia de la acidificación de la columna de agua de esta zona que presenta un pH de 6.6.

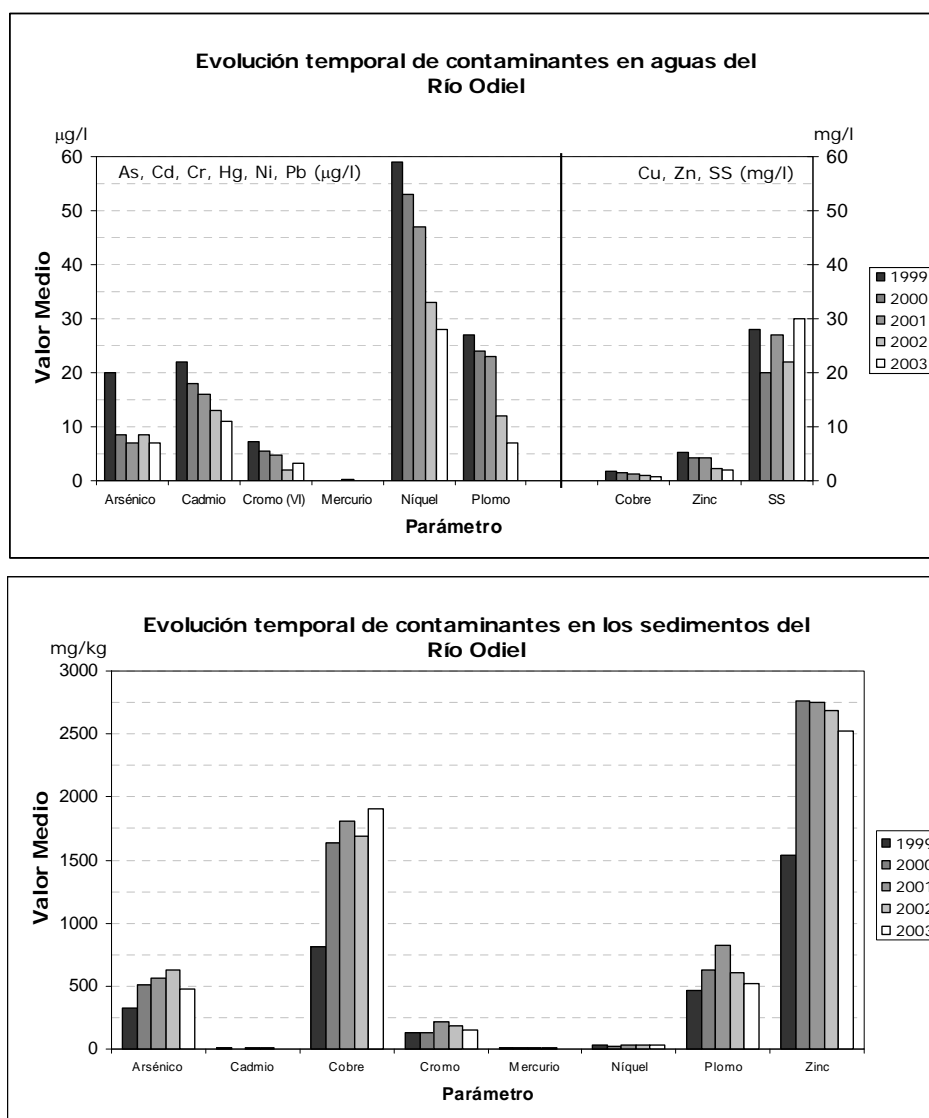


Figura 6-6. Evolución temporal de contaminantes en el Río Odiel.

Por su parte, con respecto al Río Tinto, la Figura 6-7 muestra, una vez más, que los mayores contenidos metálicos en la columna de agua se corresponden con zinc y cobre (varios mg/l), seguidos, en orden decreciente, de: arsénico, níquel, cadmio, plomo, cromo y mercurio presentes tan solo en términos de µg/l. Tal y como cabría esperarse, el medio bentónico refleja mayores concentraciones de zinc, cobre, plomo y arsénico, no obstante, al igual que sucede en el río Odiel, se observan bajas concentraciones de níquel y cadmio en el lecho bentónico. Tal y como se ha comentado, esto podría ser debido a la magnitud del coeficiente de partición

de estos metales y/o a la acidez del medio que, en esta zona, presenta un pH de 5.

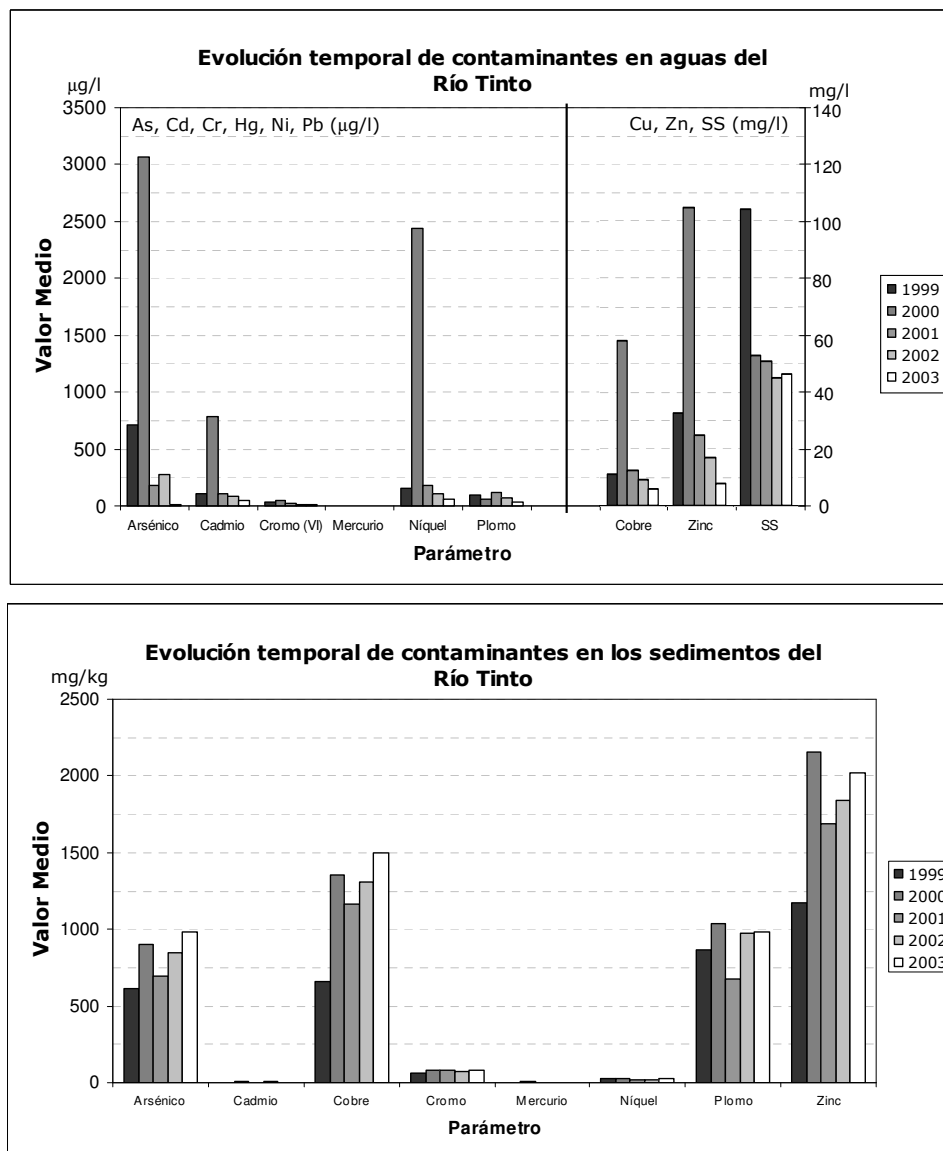


Figura 6-7. Evolución temporal de contaminantes en el Río Tinto.

Finalmente, el medio pelágico correspondiente a la zona del Canal del Padre Santo exhibe concentraciones mucho menores (orden de $\mu\text{g/l}$ en todos los casos) que las presentes en los ríos (Figura 6-8). Al igual que en los casos anteriores, se mantienen los mayores contenidos de zinc y cobre, seguidos de arsénico, plomo y níquel. Tal y como podría suponerse, el medio bentónico de esta zona muestra mayores contenidos de zinc y cobre, seguidos de plomo y arsénico.

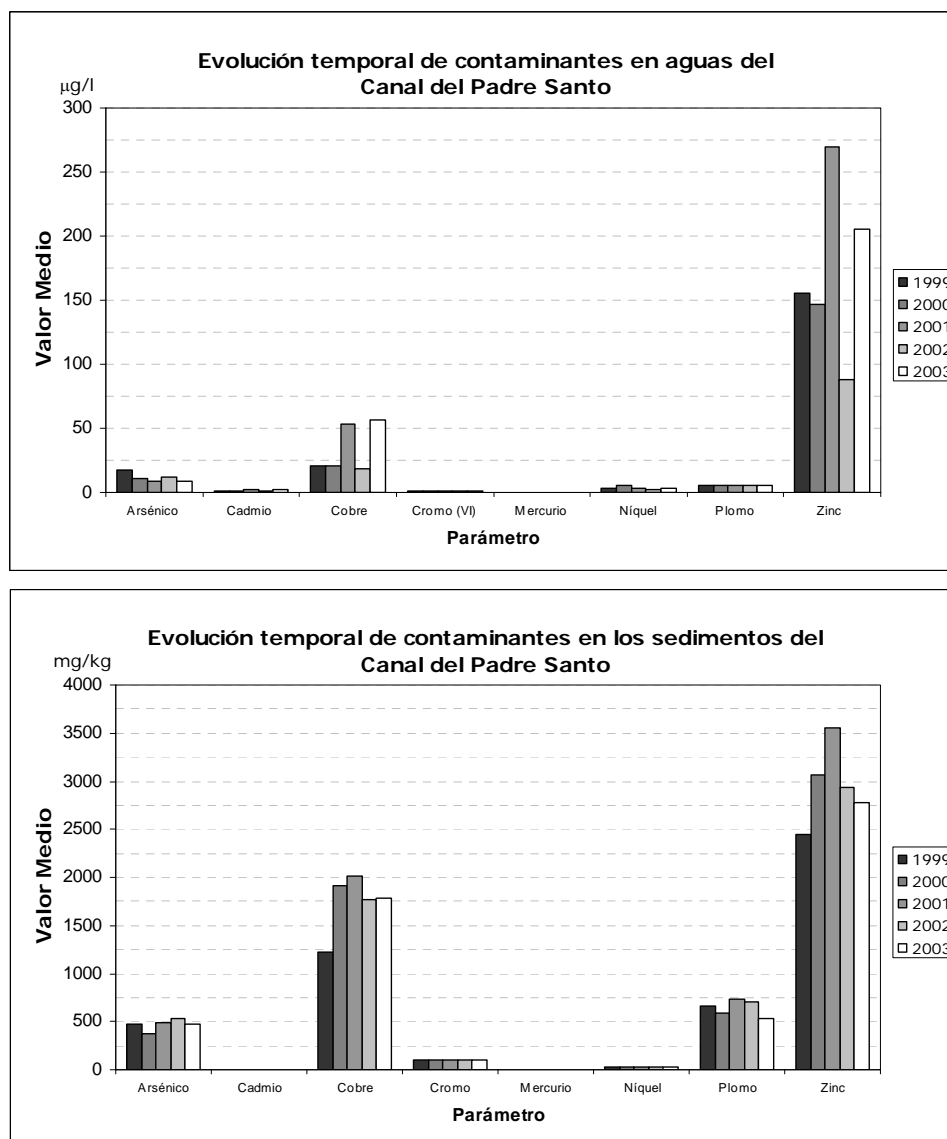


Figura 6-8. Evolución temporal de contaminantes en el Canal del Padre Santo.

Por su parte, la información relativa a los **muestreos realizados por la AIQB** (2005) para la determinación de la calidad del medio pelágico y bentónico coincide con la zona de estudio únicamente en cuatro puntos concretos de muestreo (Figura 6-9). Los datos pertenecientes a estas estaciones quedan recogidos en la Tabla 6-12, advirtiéndose que el contenido de metales pesados en agua es mayor en el río Tinto que en las otras dos zonas. No obstante, la mayor acumulación de dichos elementos en el sedimento se observa en el Río Odiel.

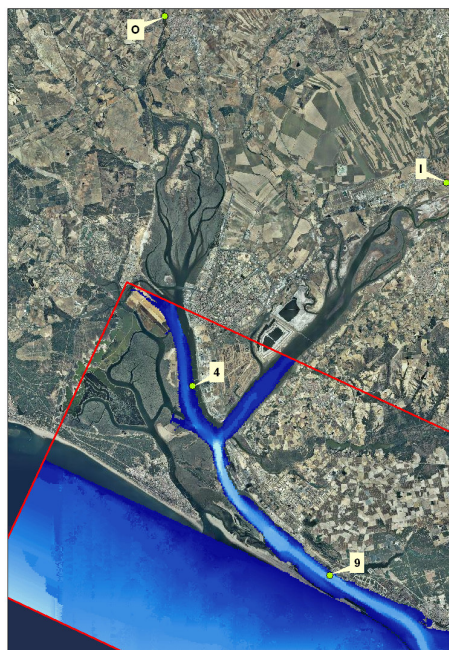


Figura 6-9. Puntos de muestreo AIQB.

Punto de muestreo	UTM X	UTM Y	Medio	Cobre	Zinc	Cadmio	Arsénico	Mercurio
O	147812.6	4144633.2	Pelágico ($\mu\text{g/l}$)	6900	16800	76	1.3	<0.1
I	160836.0	4136965.7		12500	15350	84	30	<0.1
4	149079.3	4127566.0		27	134	2.6	19	0.1
9	155433.4	4118807.6		12	40	1.1	11	0.1
O	147812.6	4144633.2	Bentónico (mg/kg)	540	440	0.45	369	2.7
I	160836.0	4136965.7		821	737	0.75	397	1.7
4	149079.3	4127566.0		2520	2900	3.45	484	3.3
9	155433.4	4118807.6		1275	1865	0.55	298	2.1

Tabla 6-12. Concentración media de metales pesados en el medio pelágico y bentónico de la Ría de Huelva (AIQB, 2005).

Tal y como puede observarse en la Figura 6-9, dos de los puntos de muestreo se corresponden con los Ríos Tinto y Odiel, pero en tramos mucho más interiores que los analizados por el Plan de Policía de la CMA de Andalucía. En estas estaciones (O e I) se observa que, en términos generales, las concentraciones de metales presentes tanto en el agua como en los sedimentos de dichos tramos son menores que las determinadas por la CMA (ver Tablas 6-8 y 6-10) debido a que la mayor actividad industrial se encuentra aguas abajo de dichos puntos (ver Figura 6-2). Por su parte, los resultados obtenidos de las estaciones 4 y 9 son equiparables a los valores medios registrados en el agua y los sedimentos del Canal del Padre Santo durante la ejecución del Plan de Policía (ver Tabla 6-8 y 6-10).

6.3. ANÁLISIS DE LOS PROCESOS DE TRANSPORTE DE LAS SUSTANCIAS CONTAMINANTES EN LA ZONA DE ESTUDIO

En primer lugar, se considera que la sustancia contaminante se comporta como un compuesto conservativo que desaparece de una masa de agua, única y exclusivamente, a través de los mecanismos de advección y dispersión presentes en la misma.

El segundo caso de estudio contempla a la sustancia contaminante como un compuesto no conservativo que desaparece de la columna de agua debido, además de los mecanismos citados previamente, a la presencia de procesos tales como volatilización, hidrólisis, fotólisis, biodegradación y un componente simplificado de sedimentación constante prescindiendo de toda interacción con el sedimento en términos de difusión o resuspensión de las sustancias contaminantes.

Finalmente, como tercer caso de estudio, se analiza el comportamiento de una sustancia contaminante tanto en la columna de agua como en los sedimentos considerando las interacciones que puedan existir entre dicha sustancia y las partículas sólidas que se encuentran en suspensión en la columna de agua o que han sido depositadas en los sedimentos. Cabe mencionar que las interacciones previamente señaladas aluden a procesos tales como: difusión entre el lecho y la columna de agua y a procesos de sedimentación y resuspensión. Por otro lado, considera mecanismos de degradación propios de la sustancia contaminante tales como: volatilización, hidrólisis, fotólisis y biodegradación. De este modo, se considera la práctica totalidad de los procesos implicados en la evolución de una sustancia contaminante de acuerdo con la dinámica sedimentaria de la zona quedando excluidos aquéllos relativos a la consolidación del lecho.

Cabe resaltar que para todos los casos planteados en esta zona de estudio se han fijado condiciones y características idénticas variando, únicamente, la aproximación metodológica utilizada.

Asimismo, cabe comentar que los datos utilizados para llevar a cabo los cálculos hidrodinámicos se corresponden con los resultados de un proceso previo de calibración (Sámano, 2007). De esta forma, las condiciones de cálculo han sido establecidas como un coeficiente de fricción de Chezy igual a 55 y una viscosidad de remolino de 3. En cuanto a los contornos, se ha introducido por el contorno del lado izquierdo una onda de marea generada utilizando la base de datos de Grenoble para dos períodos distintos de 31 días. Uno comprendido entre el 08 de Junio y el 08 de Julio de 2005 y, otro, entre el 27 de Noviembre y el 27 de Diciembre de 2005 a fin de poder

contrastar el efecto de la estacionalidad de los aportes fluviales que, en esta zona de estudio, resulta sumamente significativa puesto que, tal y como se ha comentado, los mayores aportes de metales pesados provienen, precisamente, de los Ríos Tinto y Odiel. Se ha considerado, asimismo, que dicha onda es totalmente absorbida por el contorno del lado derecho. Por su parte, por el contorno superior se han introducido los caudales de los Ríos Odiel y Tinto considerando el caudal medio de ambos ríos durante los citados períodos. Finalmente, el contorno inferior ha permanecido cerrado.

Puesto que los aportes metálicos de los Ríos Tinto y Odiel, superan, ampliamente, los aportes de origen industrial, se ha considerado el valor medio de los caudales fluviales a fin de transformar los valores de carga metálica (Tabla 6-3) en sus correspondientes concentraciones dividiendo los valores de carga registrados (Tm/año) entre el caudal medio anual (Hm³/año). Esto ha permitido la obtención de la concentración de metales pesados en mg/l (Tabla 6-13). No obstante, cabe recordar que dicha concentración se corresponde con la concentración global de un grupo de cinco metales: cobre, zinc, cadmio, arsénico y mercurio.

Aportes metálicos* (mg/l)	Caudal (Hm ³ /año)	Año					Promedio (mg/l)
		2001	2002	2003	2004	2005	
Provenientes del Río Odiel	405	17.28	14.32	9.38	19.51	23.78	16.85
Provenientes del Río Tinto	160	28.13	37.50	23.13	22.50	27.96	27.84

* Metales: Cobre, Zinc, Cadmio, Arsénico y Mercurio.

Tabla 6-13. Concentración de metales pesados presente en los aportes fluviales recibidos por la Ría de Huelva.

Por tal motivo, haciendo uso de la información recogida en la Tabla 6-12 para las estaciones I y O, localizadas en los Ríos Tinto y Odiel, respectivamente, se ha calculado la fracción que representa cada metal dentro de este grupo de acuerdo con las concentraciones de metales pesados detectadas en forma individual en ambos ríos (Tabla 6-14).

Punto de muestreo	Fracción de cada elemento metálico				
	Cobre	Zinc	Cadmio	Arsénico	Mercurio
Río Odiel (Estación O)	0.2902	0.7066	0.0032	0.0001	4.21E-06
Río Tinto (Estación I)	0.4470	0.5489	0.0030	0.0011	3.58E-06

Tabla 6-14. Distribución de los elementos metálicos presentes en los Ríos Tinto y Odiel.

De este modo, ha sido posible el establecimiento de la concentración individual (Tabla 6-15) de cada metal presente en ambos ríos multiplicando la concentración media global (16.85 mg/l para el Río Odiel y 27.84 mg/l para el Río Tinto) por las fracciones previamente calculadas.

Punto de muestreo	Cobre (mg/l)	Zinc (mg/l)	Cadmio (mg/l)	Arsénico (mg/l)	Mercurio (mg/l)	Total (mg/l)
Río Odiel (Estación O)	4.89	11.91	0.05	9.21E-04	7.09E-05	16.85
Río Tinto (Estación I)	12.45	15.28	0.08	0.03	9.96E-05	27.84

Tabla 6-15. Concentración individualizada de metales presentes en los Ríos Tinto y Odiel.

A la luz de esta información, se ha seleccionado el zinc como sustancia de estudio debido a que es el metal que se presenta en mayor abundancia y que, por tanto, permitirá visualizar de forma más clara las diferencias y similitudes de los resultados obtenidos con los distintos modelos utilizados. Para esta sustancia, considerada como peligrosa por la Ley 42/2007, el objetivo de calidad en agua se corresponde con una concentración media anual de 60 µg/l, calculada como la media aritmética de los valores medidos en las muestras recogidas durante un año. El 75% de las muestras recogidas durante un año no deben exceder los valores de dicho objetivo de calidad y, en ningún caso, los valores encontrados pueden sobrepasar en más de un 50% el valor del objetivo de calidad establecido. Cabe comentar que para aquellos casos en los que la concentración sea inferior al límite de cuantificación, para calcular la media, debe utilizarse el límite de cuantificación dividido por dos. Con respecto al objetivo de calidad relativo a los sedimentos, la citada Ley únicamente estipula que la concentración de este contaminante no debe aumentar significativamente con el tiempo.

Así pues, en la Tabla 6-16 se sintetizan las condiciones de caudal y concentraciones de sólidos en suspensión y de zinc introducidas a los distintos modelos utilizados para llevar a cabo las simulaciones correspondientes a las tres aproximaciones que se detallan a continuación. Cabe comentar que la caracterización de los vertidos de origen industrial se ha establecido en función de la información recogida en la Autorización Ambiental Integrada de las empresas asentadas en la Ría de Huelva.

Puntos de vertido		Celdas (Malla 311 x 536)		Caudal m ³ /s	SS mg/l	Zinc mg/l	Procedencia
UTM30 X	UTM30 Y	Celda X	Celda Y				
149272	4128115	45	86	0.0002	300	0.1	Industrial
149432	4127595	56	93	0.0062	250	3.0	Industrial
149505	4127159	68	101	0.0317	20	3.0	Industrial
152070	4121939	147	208	0.0095	150	1.0	Industrial
153206	4120749	154	227	0.0817	200	0.2	Industrial
Información de contorno				12.8425	25	11.9	Río Odiel
Información de contorno				5.0736	60	15.3	Río Tinto

Tabla 6-16. Casos de estudio planteados en función de los vertidos identificados en la Ría de Huelva.

Finalmente, con respecto a los sólidos en suspensión, se observa que los caudales fluviales representan un aporte medio de alrededor de 35 mg/l, mientras que en los distintos vertidos identificados en la zona, dicho parámetro se encuentra en un rango de concentraciones que oscila entre 20 y 300 mg/l, aproximadamente.

6.3.1. Primera aproximación: compuesto conservativo

Esta primera aproximación, basada en la ecuación de conservación de la cantidad de masa de una sustancia presente en la columna de agua del medio, lleva a su expresión más simple el estudio de una sustancia contaminante en el medio estuarino. Considera, tal y como se ha comentado, a la sustancia contaminante en cuestión como un compuesto conservativo que va desapareciendo gradualmente de una masa de agua como consecuencia de los procesos de advección y dispersión obviando la reacción o interacción que pudiera presentar con otras sustancias u organismos presentes en el medio acuático.

En este contexto, el efecto de los aportes fluviales adquiere especial importancia, por tal motivo, se han establecido dos casos diferenciados de acuerdo con sus características estacionales: para el primer caso, se ha considerado la situación de un caudal medio de escasa magnitud correspondiente al período junio-julio mientras que para el segundo, se ha considerado un caudal medio bastante mayor correspondiente al período noviembre-diciembre (ver Tabla 6-6).

A modo de ejemplo, en la Figura 6-10 se presenta la evolución de una emisión de zinc procedente, en su mayoría, de los ríos Tinto (33.66%) y Odiel (66.28%) así como de distintos vertidos industriales presentes en la zona (0.06%) (Tabla 6-16). Cabe comentar que el análisis de resultados se ha centrado en la Zona I de la Zona de Servicio Portuario del Puerto de Huelva puesto que ésta es la zona que recibe una mayor presión y, por tanto, requiere de la aplicación de medidas de gestión adecuadas a la problemática que presenta.

Tal y como se ha comentado en el capítulo anterior, la escala utilizada para la representación gráfica de los resultados obtenidos emplea dos colores, por un lado el color azul que indica el cumplimiento del objetivo de calidad y, por otro lado, el color morado, que revela su incumplimiento. Para ambos colores, se adopta una tonalidad más intensa cuanto mayor sea la concentración de zinc en la columna de agua.

Para el caso de la Ría de Huelva, puesto que la mayor cantidad de zinc que llega al medio depende directamente del caudal de los ríos Tinto y Odiel, la simulación realizada bajo condiciones de caudal estival (Figura 6-10 izq.) muestra, por un lado, una menor extensión del zinc en el medio estuarino permaneciendo la última sección de la ría libre de este contaminante o, al menos, por debajo del objetivo de calidad aplicable a esta sustancia peligrosa. Por otro lado, en comparación con los resultados obtenidos para un caudal mayor (Figura 6-10 dcha.) exhibe menores concentraciones a lo largo de toda la zona de estudio.

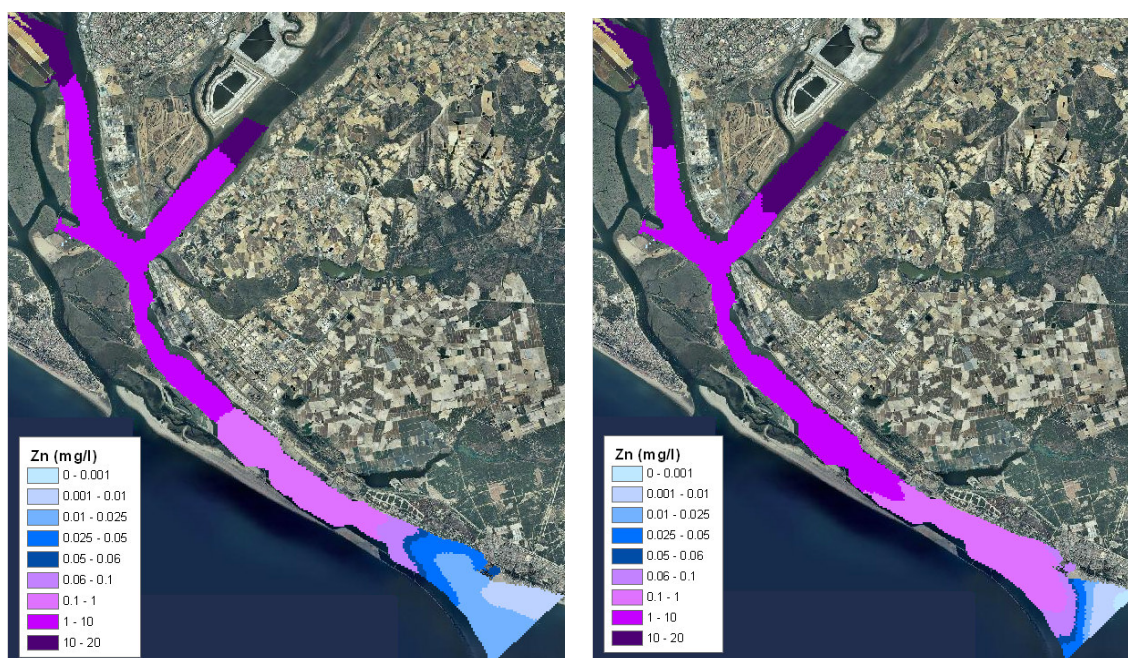


Figura 6-10. Estudio de la evolución de una emisión de zinc durante los meses de junio (izq.) y diciembre (dcha.) utilizando un modelo conservativo.

6.3.2. Segunda aproximación: compuesto no conservativo

Al igual que en el caso anterior, esta segunda aproximación se fundamenta en los procesos de advección y dispersión considerando, además, como aspecto diferenciador del caso conservativo, una tasa simplificada de sedimentación del zinc en función de la concentración particulada y la velocidad de sedimentación. El cálculo de dicha tasa requiere del establecimiento de un diámetro de partícula, el cual, ha sido fijado en 20 micras puesto que, tal y como se ha discutido en el capítulo anterior, a partir de esta dimensión la agregación resulta despreciable (Wu y Falconer, 2000). Además, el sedimento cohesivo representa un mejor medio de transporte para las sustancias contaminantes.

Para llevar a cabo esta segunda aproximación, también resulta fundamental el establecimiento del caudal apropiado para los ríos Tinto y Odiel puesto que son los principales proveedores de zinc a la Ría de Huelva. Por ello, las simulaciones se han realizado para dos periodos de condiciones de caudal bien diferenciadas: invierno y verano.

La simulación del caso de estudio bajo esta aproximación conduce a los resultados que se observan en la Figura 6-11. Así pues, puede advertirse

que la extensión que alcanza la emisión contaminante de zinc en la temporada de invierno (Figura 6-11 dcha.) es mayor debido al aumento de los caudales fluviales durante este periodo. A diferencia del caso anterior, la introducción de una dinámica de degradación propia del zinc conduce a un resultado de cumplimiento del objetivo de calidad para la totalidad del Canal del Padre Santo en ambos períodos de estudio y para una buena parte de los ríos Tinto y Odiel en condiciones de estiaje (Figura 6-11 izq.).

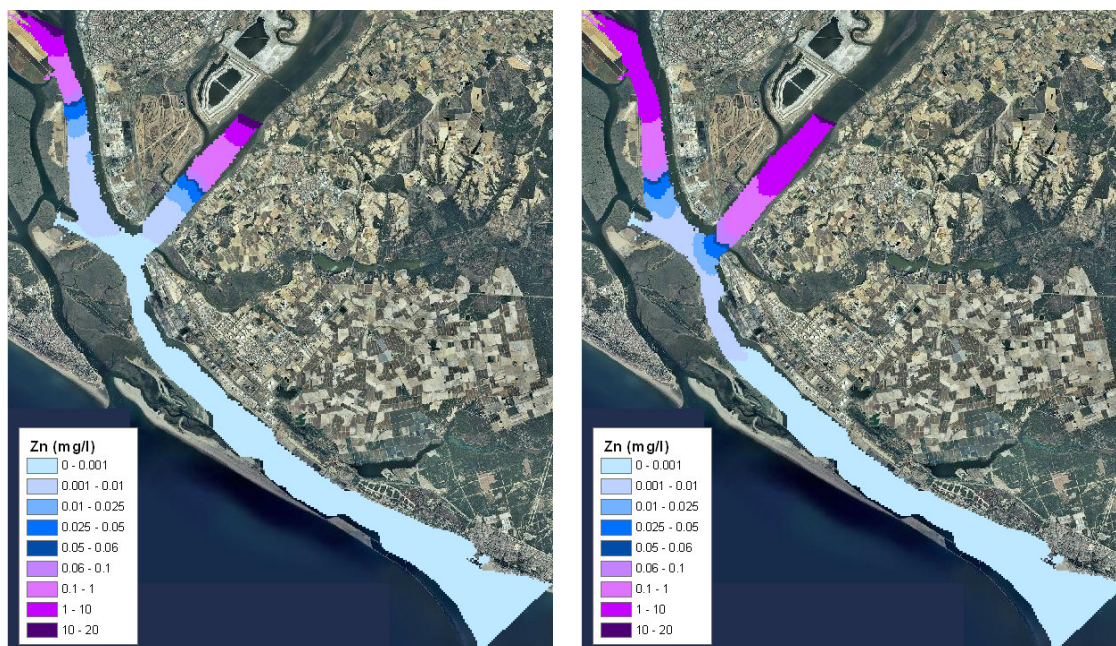


Figura 6-11. Estudio de la evolución de una emisión de zinc durante los meses de junio (izq.) y diciembre (dcha.) utilizando un modelo no conservativo.

6.3.3. Tercera aproximación: interacción con partículas sólidas

Por último, la tercera aproximación implica la interacción del zinc con las partículas en suspensión presentes en el medio. Para ello, se han utilizado valores de sólidos en suspensión de 60 y 25 mg/l para los Ríos Tinto y Odiel, respectivamente. Éstos se corresponden con la media de los valores registrados entre 1999 y 2003 (Tabla 6-9) de acuerdo con las determinaciones realizadas como parte del Plan de Policía de la Consejería de Medio Ambiente de Andalucía. Asimismo, se han considerado las concentraciones de sólidos en suspensión presentes en los vertidos de origen industrial (Tabla 6-16).

Para llevar a cabo estas simulaciones, además de tomar en cuenta las variaciones de caudal y las características propias del zinc, es necesaria la consideración de ciertos parámetros adicionales que complementan la información requerida por el modelo desarrollado. Entre éstos se encuentran las variables específicas de este módulo de cálculo que se mencionan a continuación: densidad del sedimento tanto seco como húmedo, densidad global del sedimento, fracción disuelta en el sedimento, concentración basal de la sustancia contaminante tanto en agua como en sedimentos y tensiones de lecho, de erosión y de sedimentación. Cabe mencionar, asimismo, que este módulo hace uso de ciertas variables que comparte con el módulo de sustancias no conservativas utilizado en la aproximación previamente descrita tales como el diámetro y densidad de partícula.

Si bien es cierto que la implicación de todas estas variables incrementa el grado de precisión de los resultados obtenidos con la ejecución del modelo desarrollado, es cierto también que su determinación no resulta tarea sencilla puesto que muchos de estos parámetros son propios de cada zona de estudio y, por tanto, deben ser determinados a través de campañas de campo diseñadas específicamente a tales efectos. En este sentido, cabe comentar que, desafortunadamente, no ha sido posible llevar a cabo los estudios de campo requeridos para establecer los parámetros sedimentarios propios de la Ría de Huelva. Por tal motivo, se han utilizado los valores obtenidos por Vidal et al. (2005) para los parámetros sedimentarios del Caño Sancti Petri en la Bahía de Cádiz puesto que se trata de un canal de marea que se extiende desde el saco interno de la bahía hasta su desembocadura en el Océano Atlántico cuyas características pueden, de alguna manera, resultar similares a las de la Ría de Huelva. Para el resto de parámetros se han utilizado valores genéricos (densidad del sedimento seco y húmedo, densidad global, etc.).

De acuerdo con dichos autores los valores que adquieren los cuadrados de las velocidades críticas limitativas de erosión (u_{*e}^2) y sedimentación (u_{*d}^2) son de 6.5 y 2.7 cm^2/s^2 , respectivamente. Con base en ello, ha sido posible determinar una tensión de sedimentación de 0.2768 N/m^2 y una tensión de erosión de 0.6663 N/m^2 con arreglo a las formulaciones presentadas en las Tablas 2-19 y 2-21, respectivamente. Cabe comentar que la densidad de partícula se ha fijado en 2650 kg/m^3 .

Los parámetros previamente calculados han permitido llevar a cabo una simulación aproximada del comportamiento del zinc en el medio considerando la interacción que experimenta esta sustancia contaminante con las partículas en suspensión y con el lecho bentónico.

Cabe mencionar que durante la ejecución de esta simulación se consideró una concentración basal de 4500 mg/l de zinc para el lecho bentónico.

Dicha concentración se calculó con base en los resultados obtenidos por Davis et al. (2000) para la zona del río Tinto (2348 mg/kg) y a partir de las concentraciones medias registradas por la CMA de Andalucía correspondientes a 5 años de muestreo: 2434 mg/kg para el Río Odiel, 1710 mg/kg para el Río Tinto y 3000 mg/kg para el Canal del Padre Santo. Con respecto a la concentración basal de zinc en el agua, con base en los resultados obtenidos en el capítulo anterior, se estableció una concentración de 0.001 mg/l.

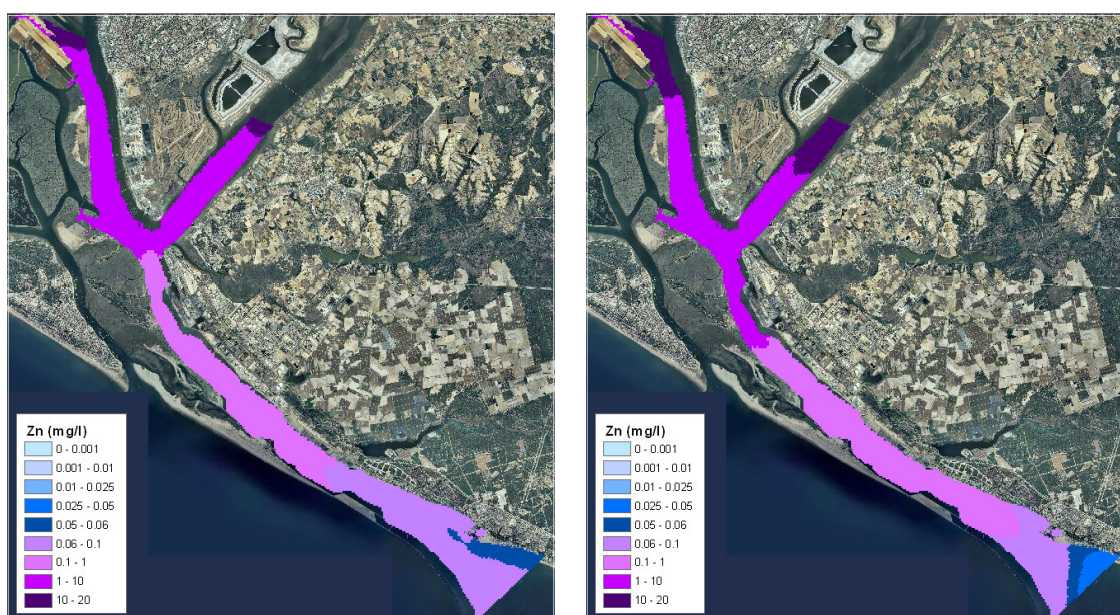


Figura 6-12. Estudio de la evolución de una emisión de zinc en la columna de agua durante los meses de junio (izq.) y diciembre (dcha.) utilizando un modelo no conservativo que considera la interacción con partículas sólidas.

El conocimiento del estado basal de la zona de estudio resulta un aspecto fundamental no solo a fines de poder plantear un modelado numérico más preciso, también dictamina decisiones críticas en términos de gestión. No obstante, existe un desconocimiento, prácticamente total, al respecto. Por tal motivo, es preciso enfatizar futuros esfuerzos de investigación con respecto a la determinación de esta variable.

A diferencia de la aproximación previa, la ejecución del modelo desarrollado considerando las interacciones de la sustancia contaminantes con los sedimentos, ha indicado concentraciones mayores de zinc a lo largo de la Ría de Huelva mostrando un incumplimiento del objetivo de calidad en la práctica totalidad de la misma (Figura 6-12). Esto se debe a la influencia que ejercen los sedimentos como una fuente permanente de zinc.

Asimismo, tal y como puede observarse en la Figura 6-13, dicha concentración muestra un incremento en los sedimentos de los Ríos Tinto y Odiel debido a que los aportes de estos ríos se constituyen como la mayor fuente de zinc a la Ría de Huelva, por tal motivo, los procesos de sedimentación en estas zonas conducen a la acumulación de este metal en el lecho bentónico de ambos ríos. Cabe resaltar que puesto que tanto la acumulación como la liberación de zinc, hacia o desde el fondo, resulta un proceso lento, la diferencia de los resultados obtenidos para un período de verano y uno de invierno no resulta significativa.

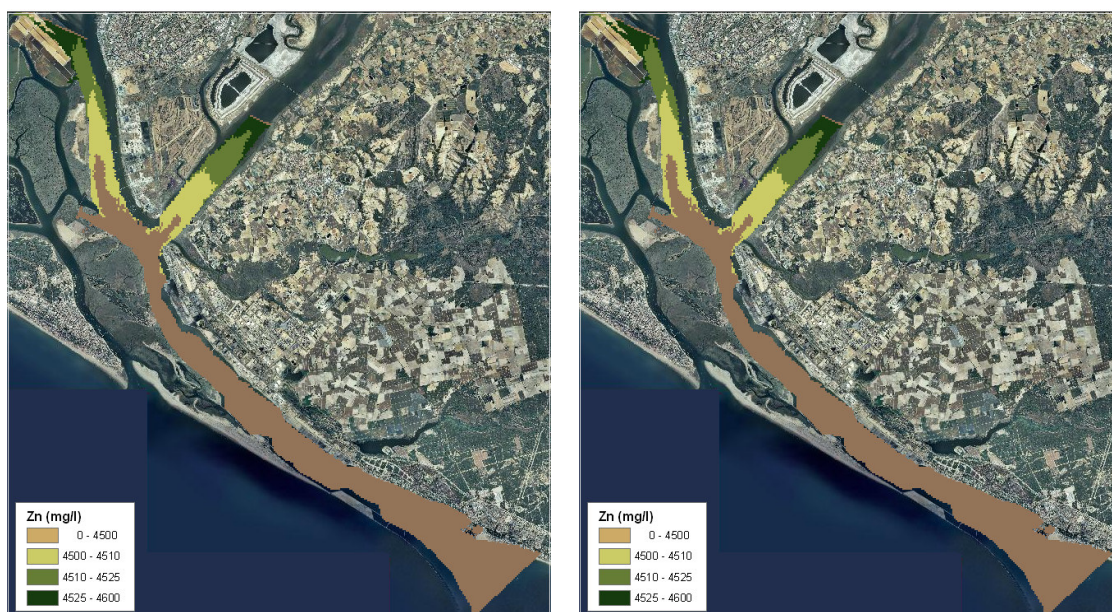


Figura 6-13. Estudio de la evolución de una emisión de zinc en el lecho bentónico durante los meses de junio (izq.) y diciembre (dcha.) utilizando un modelo no conservativo que considera la interacción con partículas sólidas.

Tal y como se ha comentado, la información disponible sobre la calidad del medio no permite hacer una comparación puntual de los resultados obtenidos, no obstante, es posible llevar a cabo una comparación por zona utilizando la herramienta SIG "Zonal Statistics" a partir de la cual se han calculado los resultados recogidos en la Tabla 6-17.

Zona de estudio	Modelado			Real 1999-2003
	Verano	Invierno	Promedio	
Río Odiel (mg/l)	1.38	2.41	1.90	3.56
Río Tinto (mg/l)	1.58	3.36	2.47	30.00
Canal Padre Santo (mg/l)	0.08	0.11	0.10	0.18

Tabla 6-17. Comparación de valores medios (modelados y reales) en agua.

La infravaloración que el modelo hace de la concentración de zinc en el agua es el resultado, por un lado, de la utilización de parámetros genéricos y, por otro lado, de la determinación del estado basal de los sedimentos. Por tal motivo, a fin de calibrar adecuadamente el modelo, sería necesario contar con información más detallada sobre la calidad del medio en puntos de control concretos así como con los parámetros sedimentarios propios de la zona de estudio.

No obstante, como fruto de la aplicación de esta tercera aproximación ha sido posible la obtención de valores orientativos que, aunque no reproducen la realidad física de la Ría de Huelva, pueden resultar de utilidad en términos de gestión puesto que indican las zonas de mayor acumulación de sedimentos y contaminantes permitiendo establecer una estrategia de dragado adecuada, por ejemplo.

6.4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Tal y como puede observarse en la Figura 6-14, la utilización de un modelo conservativo sobrevalora la concentración de zinc presente en la columna de agua. Por su parte, la utilización de un modelo no conservativo que excluya las interacciones con los sedimentos, conduce a una infravaloración altamente significativa de la concentración de esta sustancia contaminante, puesto que, desprecia una de las mayores fuentes de zinc a las aguas de la Ría de Huelva: sus sedimentos.

Por tal motivo, una aproximación más real para llevar a cabo el análisis del comportamiento del zinc en esta zona se corresponde con la tercera aproximación planteada, de acuerdo con la cual, los resultados obtenidos para el Río Odiel y para el Canal del Padre Santo pueden considerarse como apropiados si se utilizan con fines orientativos puesto que coinciden en orden de magnitud con los resultados obtenidos de campañas de campo (Tabla 6-17). Sin embargo, la diferencia que se observa entre los valores modelado y experimental del Río Tinto puede deberse, además de los problemas propios del modelado, relacionados con el uso de parámetros genéricos, a problemas debidos a la determinación experimental de la concentración de zinc en esta zona puesto que se observan variaciones ostensibles entre las diferentes campañas realizadas. Así por ejemplo, se registra una determinación de 105 mg/l de zinc correspondiente a la campaña del año 2000, frente a la cuantificación de 8 mg/l en el año 2003 (Tabla 6-9).

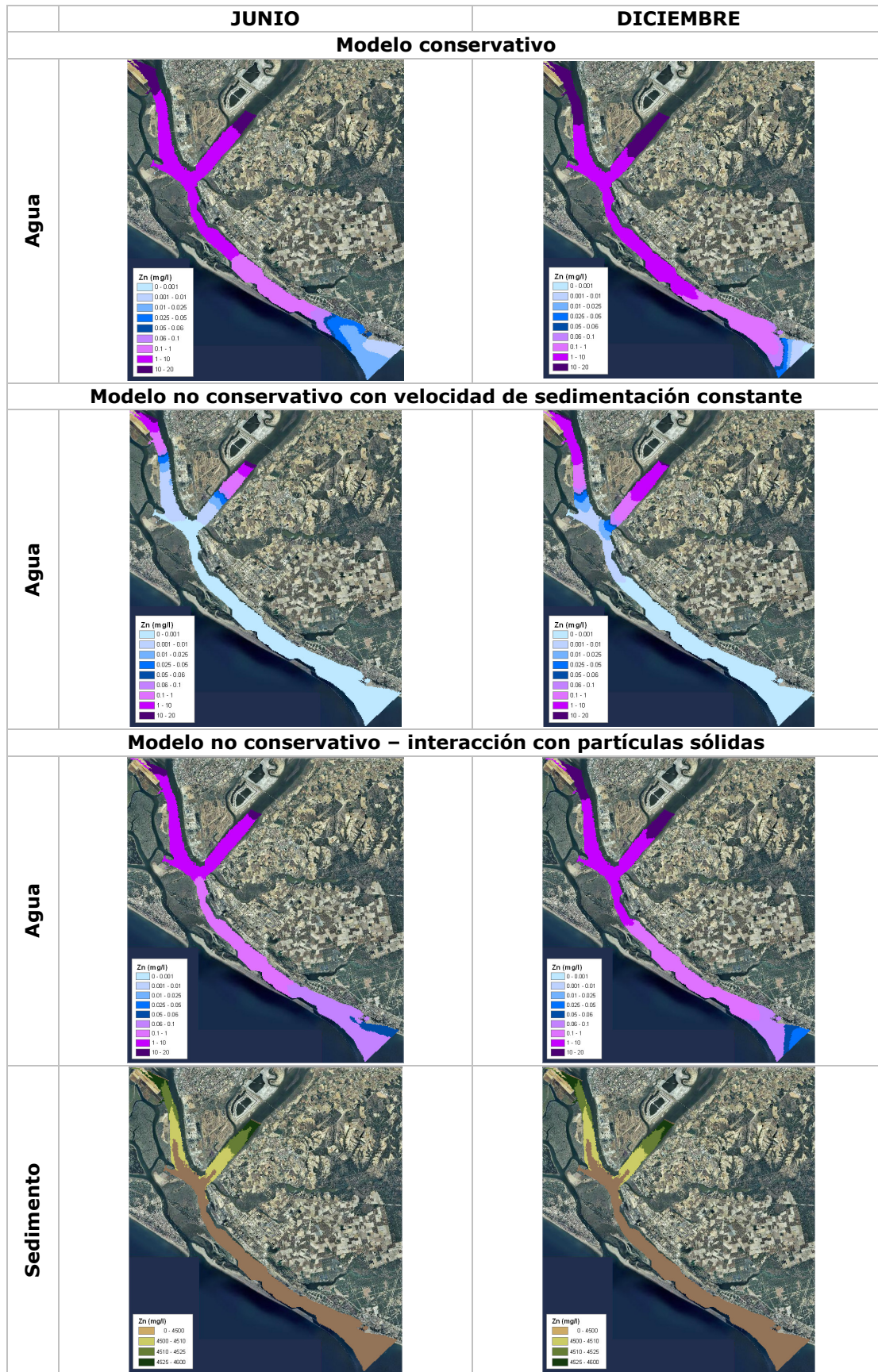


Figura 6-14. Síntesis de resultados obtenidos mediante las tres aproximaciones planteadas.

Además, la utilización de esta última aproximación permite conocer las zonas de mayor sedimentación y, por tanto, de mayor acumulación de zinc en la zona de estudio tal y como se muestra en la Figura 6-15.



Figura 6-15. Zonas de mayor acumulación de sedimentos en la Ría de Huelva.

6.5. CONCLUSIONES

Los mayores aportes de zinc a la Ría de Huelva provienen de los ríos Tinto y Odiel así como de los sedimentos de esta zona que, con el paso del tiempo, han venido acumulando metales pesados que pueden ser liberados a la columna de agua.

Sin duda, es necesario profundizar en el conocimiento de los parámetros sedimentarios propios de la Ría de Huelva, así como en el estudio del estado basal del contenido de metales pesados que han sido almacenados históricamente en el lecho bentónico de esta zona. Todo ello con el objetivo de proporcionar información específica al modelo de tal forma que sea capaz de reproducir la realidad física de forma más precisa tras la calibración oportuna.

No obstante, los resultados obtenidos mediante la tercera aproximación pueden establecerse como un buen punto de partida a efectos de la construcción de un panorama global de gestión capaz de constituirse como un apoyo en la toma de decisiones sobre los actuales vertidos.

La ejecución de esta simulación orientativa permite identificar las zonas más vulnerables y, en consecuencia, actuar con mayor rapidez y eficacia sobre ellas. Así pues, en términos generales, la Figura 6-16 indica claramente la necesidad de aplicar medidas de actuación aguas arriba del Río Tinto puesto que las concentraciones de zinc detectadas en esta zona se encuentran muy por encima del nivel establecido por el objetivo de calidad correspondiente afectando a una masa de agua considerada como Lugar de Importancia Comunitaria.

Por otro lado, se advierte la necesidad de un programa de vigilancia y/o control en la margen derecha del río Odiel puesto que las altas concentraciones de zinc detectadas pueden llegar a afectar estas marismas consideradas como Lugar de Importancia Comunitaria y Zona de Especial Protección para Aves.

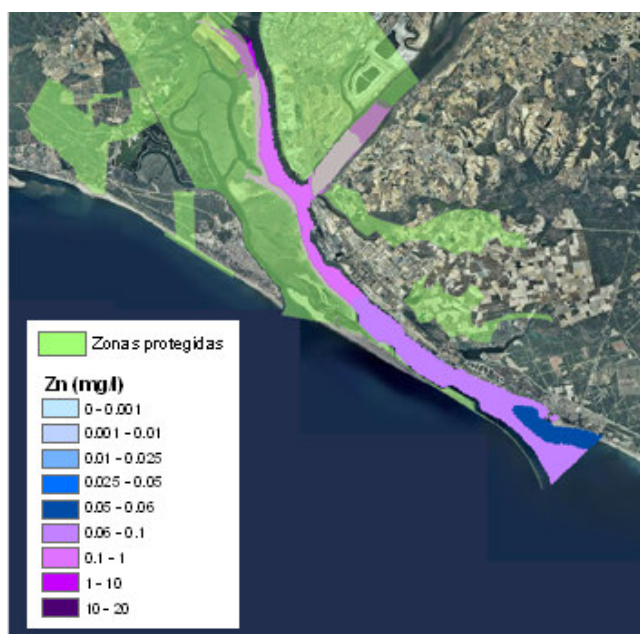


Figura 6-16. Identificación de las masas de agua más vulnerables frente a una emisión de zinc.

Finalmente, cabe comentar que la información proporcionada por el modelo desarrollado permite establecer estrategias de gestión más adecuadas debido a que provee valiosa información con respecto a las zonas de mayor acumulación tanto de sedimentos como de metales pesados, lo cual, permite, a su vez, llevar a cabo trabajos de dragado más eficaces.