

**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**

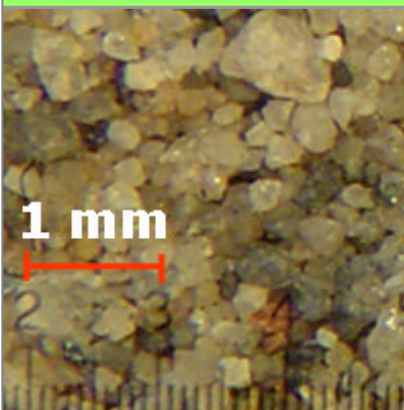
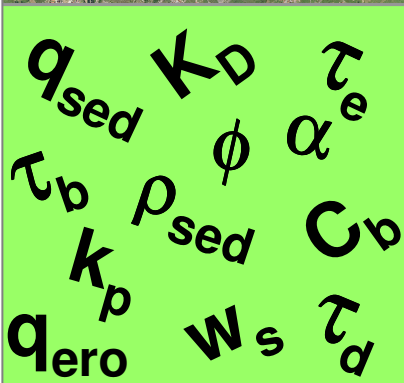
María Luisa Sámano Celorio

**DIRECTORES**

Andrés García Gómez

José Antonio Revilla Cortezón

Santander, 2011



## **7. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO**

---

En este capítulo se presenta, por un lado, una síntesis de las conclusiones obtenidas en cada uno de los capítulos precedentes y, por otro lado, una recopilación de las líneas de trabajo en las que se requiere profundizar el proceso de investigación.

Enmarcadas dentro del contexto de aseveraciones más significativas derivadas del actual estado del conocimiento, se recogen las conclusiones más importantes correspondientes al modelo desarrollado así como aquellas alusivas a los resultados obtenidos en los distintos casos de estudio analizados para los estuarios seleccionados (Ría de San Martín y Ría de Huelva). Finalmente, se plantean las conclusiones más relevantes relacionadas con el uso de Sistemas de Información Geográfica para la gestión y representación de la información generada a través del modelado numérico.

Por su parte, en cuanto a las futuras líneas de investigación que se plantean se incide en puntos específicos relacionados con el propio modelo numérico, con la cantidad y calidad de los datos de campo y con el entorno SIG puesto que éstas se constituyen como las distintas áreas de oportunidad en las que es posible llevar a cabo aportaciones ulteriores.

## **7.1. CONCLUSIONES**

---

La evidente extensión comercial aunada al interés académico en el modelado de la calidad de las aguas en las zonas costeras y estuarinas refleja la creciente importancia de la legislación concerniente a la protección ambiental así como la necesidad de una gestión apropiada. Así pues, aunque este campo ha experimentado considerables avances en los últimos años aún queda mucho por hacer para mejorar los modelos existentes a través de la permanencia activa de la investigación.

En sus orígenes, la modelización fue concebida como la capacidad de llevar el conocimiento más allá, sin embargo, actualmente se considera también como un medio para preparar nuestras acciones. Desafortunadamente, por regla general, se carece de información de campo suficiente para poder llevar a cabo la calibración y validación de los modelos numéricos de forma satisfactoria. Este aspecto resulta fundamental puesto que la capacidad de previsión dependerá tanto del modelo como de la calidad de las condiciones iniciales y de la información alimentada.

Dado que no existe un modelo universal válido para cualquier caso de estudio, ni un modelo capaz de simular todos y cada uno de los parámetros involucrados en el análisis de un fenómeno en particular, es preciso seleccionar cuidadosamente el modelo más apropiado para cada situación, considerando las condiciones y características propias de cada caso de estudio. Aún así, debe tenerse siempre presente que, probablemente, el análisis de ciertos parámetros pueda permanecer limitado. Para salvar tales limitaciones, cabe recordar que los modelos existentes se constituyen como un marco sobre el cual es posible llevar a cabo implementaciones y desarrollar nuevos módulos dentro del modelo mediante la introducción de las formulaciones matemáticas correspondientes para lograr una adecuada representación del fenómeno bajo estudio. Si bien los módulos o modelos que vayan surgiendo como consecuencia de este proceso no suelen dar lugar a un modelo de carácter general, son altamente enriquecedores en términos de la calidad de los resultados obtenidos. De hecho, dicha calidad depende, por igual, de la eficiencia de las técnicas y modelos numéricos empleados así como del conocimiento y de las verdaderas capacidades y limitaciones de las formulaciones introducidas.

En este contexto, esta tesis se ha centrado en la implementación de un módulo dentro de un modelo de transporte capaz de analizar el comportamiento de los sólidos en suspensión como una sustancia no conservativa que interactúa con las sustancias prioritarias y peligrosas presentes en el medio, tanto en la columna de agua como en el lecho bentónico. Ello ha implicado la modelización de los procesos que pueden

ocurrir en cualquiera de éstos tales como: sedimentación y resuspensión, difusión entre la columna de agua y el lecho bentónico, degradación (hidrólisis, fotólisis y biodegradación), volatilización y pérdida definitiva en capas más profundas del sedimento.

A pesar de que, en términos generales, la forma disuelta de los contaminantes suele ser más tóxica y más reactiva química y biológicamente, el impacto de la forma particulada resulta más significativo a largo plazo debido a su capacidad de acumulación y a su habilidad de actuar como una fuente secundaria de contaminantes disueltos. Por tal motivo, se ha considerado que este esfuerzo resulta fundamental puesto que la contaminación de sedimentos es considerada por varios organismos ambientales internacionales como el mayor riesgo en los ambientes acuáticos. Por tal motivo, la predicción del transporte, erosión y deposición de los sedimentos es una labor de suma importancia para el entendimiento de las características de la calidad de los cuerpos de agua.

Para ello, a fin de poder resolver los términos advectivo, dispersivo y de reacción que componen a la ecuación de transporte, se ha aplicado la técnica de "splitting" resolviendo dichos términos mediante un esquema upwind, un esquema explícito centrado y el método de Runge-Kutta de orden 4<sup>o</sup>, respectivamente. Este planteamiento ha sido validado a través de su aplicación a un escenario teórico cuya solución analítica ha puesto de manifiesto que los esquemas seleccionados así como su integración dentro del modelo desarrollado proporcionan resultados satisfactorios tanto para la parte correspondiente a los procesos de advección-dispersión como a los procesos de reacción.

Cabe recordar que a pesar de existir directrices generales para la aplicación del modelo desarrollado, éste ha exigido la calibración de algunos parámetros específicos para cada caso de estudio. De este modo, aunque no resulta directamente aplicable a cualquier estuario, si representa un punto de partida estratégico para el análisis y gestión de cualquiera de ellos.

En el caso concreto de la Ría de Suances, la valiosa oportunidad que ha supuesto el poder alimentar el modelo desarrollado con algunos datos de campo obtenidos específicamente con ese objetivo, ha permitido la obtención de resultados que se ajustan a la realidad con un error relativo medio de menos del 10% y de alrededor del 23% en el caso de las predicciones de concentraciones de sólidos en suspensión y de las sustancias contaminantes analizadas, respectivamente. No obstante, cabe recordar que no ha sido posible la obtención de datos reales sobre los vertidos más significativos de esta zona, por tal motivo, fue necesario recurrir a la información presentada en las Autorizaciones Ambientales Integradas, que si bien, proporcionan cierta orientación sobre los caudales,

concentraciones y tipo de sustancias vertidas, no ofrecen los datos exactos, cuya introducción al modelo, en caso de ser conocidos, podría haber incrementado el nivel de precisión de éste.

La importancia de la consideración de la dinámica sedimentaria y de la adecuada calibración de estos parámetros ha quedado ampliamente evidenciada a lo largo de los casos de estudio analizados. En este caso concreto, los parámetros que describen dicha dinámica en la Ría de Suances fueron establecidos como:  $\tau_b=0.0623 \text{ kg/ms}^2$ ,  $\tau_e=0.0968 \text{ kg/ms}^2$ ,  $\tau_d=0.0635 \text{ kg/ms}^2$ . Por su parte, el análisis de sustancias prioritarias y peligrosas puso de manifiesto la influencia que ejerce la valoración de las fracciones disuelta y particulada, tanto en agua como en sedimentos. Asimismo, con respecto al establecimiento de la concentración basal, se ha concluido que, en la columna de agua, los resultados de la simulación no dependen de esta variable, mientras que, la concentración basal de los sedimentos ejerce una influencia altamente significativa. Por tal motivo, resulta fundamental el establecimiento de esta variable mediante estudios de campo específicos que permitan conocer la acumulación histórica de sustancias contaminantes en el lecho bentónico puesto que éste se constituye como la fuente principal de dichas sustancias a la Ría de Suances.

Cabe comentar, asimismo, que el estudio del cloroformo en la Ría de Suances ha permitido observar que la omisión de los procesos difusivos entre la columna de agua y los sedimentos, así como la simplificación de ciertos elementos implicados en la dinámica sedimentaria (segundo módulo del modelo desarrollado), pueden resultar válidas únicamente para el estudio de sustancias altamente volátiles o cuyo coeficiente de partición sea muy bajo.

Con respecto a la Ría de Huelva, se han identificado los Ríos Tinto y Odiel como las mayores fuentes de metales pesados, muy por encima de los aportes de las industrias autorizadas a verter en esta zona, cuya contribución representa tan solo un 0.06% del zinc proveniente de fuentes externas. Asimismo, se ha observado que la acumulación histórica de metales pesados en los sedimentos de la Ría de Huelva ejerce una influencia significativa en el contenido de zinc en la columna de agua puesto que dicha sustancia contaminante se libera del lecho bentónico mediante procesos difusivos.

Tras el análisis de los casos de estudio desarrollados en la Ría de Huelva se ha observado que, aún a pesar de carecer de información específica de la zona, los resultados obtenidos al reconocer al zinc como una sustancia no conservativa que interactúa con la materia en suspensión (tercer módulo del modelo desarrollado) pueden establecerse como un buen punto de partida desde una perspectiva de gestión constituyéndose como un apoyo

para la toma de decisiones. De este modo, ha sido posible la identificación del Río Tinto como la zona más vulnerable que requiere, por tanto, de una actuación rápida y eficaz. Asimismo, se ha observado que en la margen derecha del Odiel podrían llegar a verse afectadas zonas protegidas, por tal motivo, es preciso mantener un programa de vigilancia y control en dicha zona.

Finalmente, comentar que, a pesar de que las demandas computacionales de los modelos numéricos se están simplificando gracias a la disponibilidad de potentes ordenadores a costes razonables, persisten los problemas de interacción con el usuario. Por tal motivo, es necesario complementar la utilidad de los modelos numéricos con una interfaz amigable para su uso. Para ello, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se constituyen como un entorno ideal ya que poseen extraordinarias capacidades de visualización, ofrecen una mayor precisión espacial mediante la georreferenciación de todos los elementos incluidos en el proyecto y eliminan los problemas de solapamiento o desplazamiento.

Así pues, tal y como se ha visto a través de los casos de estudio desarrollados, la integración de los modelos numéricos en un entorno SIG amplía el abanico de posibilidades tanto de gestión, como de visualización de los resultados generados por éstos. Este acoplamiento provee ciertas funcionalidades para la captura, edición y procesado de datos, así como para la interpretación de resultados. Además, la integración de los modelos numéricos en un entorno SIG daría lugar a una herramienta única que resultaría muy útil y accesible para el gestor y que además le permitiría:

- Su utilización por usuarios con poca experiencia, en cuanto a programación y modelado numérico se refiere, cuando se cuenta con la calibración y validación de los modelos numéricos para la zona de interés y se asumen ciertas simplificaciones a fin de limitar la cantidad de información requerida para llevar a cabo una simulación.
- Recoger en una sola imagen la totalidad de la información relacionada con la variable que se desea analizar (zonas de mayor sedimentación, zonas en las que se incumple la Norma de Calidad Ambiental establecida, gradientes de concentración de una sustancia contaminante, etc.).
- Solucionar muchos de los retos de comunicación y coordinación generados tras el acontecimiento de un vertido puesto que podría proveer información homogénea, mapas, modelos de transporte, vistas aéreas de la evolución de las sustancias contaminantes así como la localización de los receptores más sensibles.
- Fortalecer el programa de respuesta ambiental del organismo competente frente a un evento de contaminación por vertido de sustancias contaminantes.

- Optimizar los recursos y estrategias de seguimiento y control de vertidos.
- Plantear casos ficticios (escenarios "what if") cuyo conocimiento podría contribuir a la mejora en la toma de decisiones durante un acontecimiento real.

## 7.2. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

---

Durante el proceso de elaboración de esta tesis se fueron detectando distintas áreas de oportunidad susceptibles de ser exploradas a fin de profundizar en el trabajo realizado. Si bien todas ellas resultan de interés y, seguramente, conducen a una mejora sustancial del modelo, exceden, por mucho, los objetivos planteados en el desarrollo de esta tesis. Por tal motivo, se han reservado a modo de ideas o sugerencias que siembren el origen o tracen el camino de futuras líneas de investigación capaces de enriquecer el trabajo desarrollado hasta el momento.

Con respecto al **modelo numérico**, la revisión bibliográfica llevada a cabo evidenció la conveniencia de considerar ciertos parámetros y/o procesos que no ha sido posible incluir en la versión actual: efecto del pH, cálculo del coeficiente de partición en función de la salinidad, efecto de los dragados y el transporte de arena, efecto de los procesos de mineralización y bioconcentración y procesos de consolidación. Por su parte, algunos autores se encuentran trabajando ya en el modelado ecológico (*E-coli* y nutrientes, principalmente) y su interacción con el sedimento. Asimismo, resultaría de utilidad, en términos de gestión, la implicación de variables socioeconómicas (plan de saneamiento, población, estadística, etc.) en el modelado numérico.

Por otro lado, sería recomendable introducir al modelo la lectura del diámetro de partícula a partir de una malla y no como un valor fijo puesto que este parámetro, cuya distribución suele presentar marcados patrones espaciales en las distintas zonas del estuario, influye significativamente en los resultados generados por el modelo. No obstante, si bien es factible modificar el código numérico para cambiar el formato de lectura de datos, no se cuenta con la información necesaria para construir dicha malla, por tanto, sería preciso, asimismo, llevar a cabo la determinación del diámetro de partícula en varios puntos de muestreo a fin de poder alimentar al modelo con información más precisa.

Finalmente, comentar que la tendencia de evolución del modelo desarrollado debe inclinarse hacia un modelo general por módulos, flexible y

adaptable a las necesidades del usuario permitiendo la modificación de subrutinas en lugar de tener que trabajar sobre un código fuente general de gran extensión.

Con respecto a los **datos de campo**, se ha observado la enorme escasez de información. En este sentido, se ha logrado recopilar parte de los datos necesarios a partir de una intensiva búsqueda bibliográfica que se ha complementado, en el caso de la Ría de Suances, con determinaciones experimentales y campañas de campo especialmente diseñadas con el objetivo de obtener información precisa para el cálculo de los parámetros requeridos por el modelo desarrollado. No obstante, algunas de las opciones que brinda el modelo desarrollado se sustentan en formulaciones teóricas que exigen ciertos parámetros de los que actualmente se carece. Para explotar las capacidades de tales opciones, sería preciso:

- Establecer las constantes específicas  $k_{esp}$  y  $m_{esp}$  a fin de poder considerar los procesos de floculación.
- Ahondar en el estudio del coeficiente de partición de las sustancias contaminantes de interés, tanto en agua como en sedimentos, considerando el pH, salinidad, tipo y tamaño de partícula puesto que estos factores influyen significativamente en dicho parámetro.
- Determinar los valores de  $K_H$  y  $K_{BT}$  de las sustancias contaminantes de interés en sedimentos.
- Llevar a cabo un profundo estudio de consolidación y establecer la constante asociada a este proceso.
- Realizar análisis granulométricos detallados y ensayos de velocidad de sedimentación para poder establecer la distribución del diámetro de partícula a lo largo de la zona de estudio.
- Determinar el estado basal de los sedimentos.

Asimismo, resulta recomendable determinar la correlación entre sólidos en suspensión y variables como la turbidez o la conductividad puesto que, habitualmente, se dispone de estos datos.

Con respecto a la Ría de Huelva, es necesario profundizar en el conocimiento de los parámetros sedimentarios propios de esta zona, así como en el estado basal del contenido de metales pesados que han sido almacenados históricamente en el lecho bentónico. 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. Por otro lado, se sugiere llevar a cabo un profundo estudio de los mecanismos de precipitación y adsorción-desorción de níquel y cadmio en las zonas correspondientes a los Ríos Tinto y Odiel debido a que las bajas concentraciones que se registran para estos metales en el lecho bentónico no parecen justificar las altas concentraciones detectadas en la columna de agua.



Se advierte, asimismo, la conveniencia de verificar el procedimiento de validación del modelo desarrollado contrastando la información con datos de campo suficientes.

Por último, con respecto a la integración del modelo y visualización de resultados en el **entorno SIG** se ha considerado que la mejor opción consiste en la programación de todos los procedimientos metodológicos desarrollados en esta tesis como rutinas integrables a dicho entorno. De este modo, podrían aplicarse en forma automática tal como si fueran "nuevas herramientas" propias de dicho Sistema. Asimismo, la herramienta resultante podría ser transferida a un visor web a fin de poder utilizarla directamente en campo.

Cabe mencionar que si existe interés en utilizar la estructura (ya existente) de AQUALAB 2.0 como punto de partida, sería recomendable considerar la introducción de las siguientes posibilidades:

- Integrar otros modelos de transporte RENOVA, EMITE, SOLTOX, etc.
- Recortar ficheros de batimetría
- Establecer la referenciación espacial oportuna para mallas que presentan cierto ángulo de inclinación
- Llevar a cabo procedimientos de anidación de mallas con ayuda de la herramienta "Extract by Mask"

En cualquier caso, sería deseable mejorar la vinculación entre la interfaz de visualización de capas que ofrece el SIG y los gráficos generados dentro de éste a fin de que al presionar sobre un punto pudiese desplegarse el gráfico asociado a éste directamente, es decir, sin necesidad de acceder al gestor de gráficos.