

Modelado de flujos y de calidad del agua en zonas costeras y estuarios⁽¹⁾

ROGER A. FALCONER (*)

RESUMEN. Se destaca en este artículo la creciente importancia de los problemas de contaminación de las aguas y la variedad de circunstancias en que surgen, así como la dificultad de abordar su solución por falta de criterios claros y uniformes. Tras comparar las ventajas e inconvenientes de los modelos físicos y matemáticos, se aborda con más detalle la labor del autor en estos últimos. Utilizando dos tipos de modelos: longitud de mezcla y $k-\epsilon$ se comparan los resultados para tres casos y se efectúa un análisis sobre la importancia y efectos de los distintos términos de las ecuaciones de flujo.

ABSTRACT. This article highlights the growing threat posed by contamination in coastal waters and the variety of circumstances in which this pollution occurs, together with the difficulties involved in tackling the problem, due to a lack of clear and standardized criteria. After comparing the advantages and drawbacks of the physical and mathematical models, an account is given of the work carried out by the author in this field. Using two types of model: mixing length and $K-\epsilon$, the results are compared for three cases, and an analysis is made of the importance and effects of the different terms of the flow equations.

EL PROBLEMA

En estos últimos años, se ha experimentado un interés público creciente y una mayor conciencia sobre los problemas de la contaminación, en especial los relacionados con la contaminación del agua. Los ingenieros civiles tienen que estimular y agradecer este creciente interés y preocupación por los temas hidro-ecológicos y medio ambientales, ya que la importante contribución que han realizado para combatir la polución no ha sido tradicionalmente apreciada por la sociedad europea.

En relación con la contaminación del agua existen actualmente varios estudios de valoración de los efectos sobre el medio ambiente que está llevando a cabo la industria del agua tanto en Europa como fuera de ella. Estos estudios se basan en una amplia gama de problemas medio ambientales y algunos ejemplos típicos se dan a continuación, así como las causas y problemas de la contaminación del agua que actualmente preocupan a las organizaciones de ingenieros civiles:

1. Uno de los muy variados tipos de vertidos de agua en el medio ambiente acuático es el vertido de aguas resi-

duales que se puede realizar de uno de estos tres modos. En primer lugar, por evacuación directa de los tubos de desembocadura a las aguas costeras y estuarios. En segundo lugar, por el vaciado del fango de las aguas residuales en lugares normalmente a poca distancia de la costa. En tercer lugar, mediante el vaciado a ríos y estuarios que a su vez depositan las aguas residuales en el mar. Los vertidos de aguas residuales no son solamente vertidos domésticos, sino que pueden contener hasta un 20 % de vertidos industriales. El efluente doméstico proviene tanto de las casas como de los locales comerciales y fundamentalmente contienen basuras orgánicas (por ej., residuos humanos básicos), bacterias y virus. Tomando como ejemplo al Reino Unido, 300 millones de galones (1.350.000 m³) de aguas residuales se vierten cada día en las aguas de la costa británica. Además, nueve millones de toneladas de fangos residuales húmedos, que es lo que queda una vez que los líquidos cloacales crudos han pasado a través de las plantas depuradoras, se vierten a poca distancia de la costa. Para más detalles véase ref. 1.

2. El vertido de aguas de refrigeración provenientes de centrales que queman carbón y de energía nuclear, de plantas fertilizantes y de desalación pueden causar serios problemas a la vida marina y a la acuicultura. Estos vertidos pueden llegar a aumentar la temperatura local del agua hasta 5 °C y es importante asegurar que disminuya este aumento de la temperatura local.

3. Los vertidos industriales y radioactivos de las centrales químicas y nucleares vierten sustancias potencial-

(1) Este artículo está basado en la «Conferencia IPPEN» pronunciada por el profesor Falconer en el XXIV Congreso de la IAHR. La versión completa de la conferencia será publicada en el Journal de la IAHR.

(*) Profesor, University of Bradford, UK.

mente peligrosas tales como los PCB, TBT, compuestos organoclorados, metales pesados, residuos ácidos, cesio radioactivo y plutonio 239. Los vertidos de esos residuos son frecuentes en muchos estuarios de Europa como el Humber, mientras centrales de energía como la de Sellafield vierten residuos radioactivos en menor grado.

4. Explotaciones intensivas de cultivos en la tierra y la pesca en aguas cercanas a la costa ha llevado a un aumento de la contaminación por nitrato y fosfato en ríos, debido a los fertilizantes y residuos de nitrógeno solubles y químicos para el tratamiento de enfermedades de peces y parásitos. Estos productos residuales dan lugar a un enriquecimiento de nutrientes de la columna de agua, que a su vez actúa como fertilizante, incrementando, por tanto, el crecimiento de fitoplancton y ocasionando exceso de algas y eutrofización.

5. La escasa limpieza y renovación de agua de puertos, dársenas, estuarios y cuencas costeras de gran belleza natural ocasiona problemas ecológicos similares, cuyas características son la baja calidad del agua y la acumulación a largo plazo de tóxicos, residuos industriales y domésticos que caracterizan a muchas zonas hidráulicas de estos tipos.

6. Tiempos de retención bajos en embalses y tanques de contacto del cloro llevan a una menor circulación. En los embalses esto puede dar lugar a oxígeno disuelto bajo, exceso de algas y eutrofización en la cuenca, además de tratamientos adicionales que se necesitan cuando agua de baja calidad entra en las plantas de tratamiento. En las cámaras de contacto de cloro una baja circulación significa que a menudo se tiene que añadir más cloro para desinfectar adecuadamente el efluente a través de la cámara en menor tiempo de retención del teóricamente previsto (véase ref. 2).

La mayor conciencia y preocupación de la gente en relación con los ejemplos anteriores y similares se puede atribuir a una serie de factores. Algunos de éstos se citan a continuación:

1. En estos últimos años, ha existido una conciencia cada vez mayor de los riesgos para la salud asociados con los distintos tipos de la contaminación del agua. Por ejemplo, investigaciones recientes en los EE. UU. indican una mayor incidencia del cáncer de vejiga, colon y recto en aquellas personas que beben agua con exceso de cloro (véase ref. 3), y los ingenieros civiles están actualmente trabajando en una nueva valoración del diseño de varias cámaras de cloración para reducir la dosificación del nivel de cloro (véase ref. 2).

2. Ha habido un aumento significativo en la cobertura que los medios de comunicación han dado sobre temas medioambientales, que sin duda ha dado lugar a un cambio en la opinión pública. Por ejemplo, en estos últimos dos años, los suplementos en color de gran número de periódicos dominicales han estado exclusivamente dedicados a la contaminación del agua; un gran emisario submarino en Scarborough, un pequeño puerto pesquero situado en la costa noroeste de Inglaterra, ha

tenido una gran publicidad, a saber, una página en dos periódicos nacionales y 20 minutos en la televisión británica. Probablemente ningún otro proyecto de ingeniería civil haya recibido una cobertura tan extensa por parte de la prensa nacional y televisión en el Reino Unido en los últimos años, con la excepción del túnel del Canal.

3. El mayor tiempo libre y un nivel de vida más alto han incrementado, asimismo, la conciencia pública sobre las diferentes clases de contaminación. El turismo y las pequeñas vacaciones a los puntos marítimos de verano, los deportes de agua y los viajes al extranjero han ido en aumento y han hecho tomar más conciencia sobre la contaminación del agua.

4. Actualmente los temas medioambientales y sus intereses figuran con seguridad en los asuntos políticos a tratar, factores tales como el efecto invernadero, la creación del partido ecologista en Europa, los temas de la Comunidad Europea y las preocupaciones de los VIPs por Europa han influido a políticos de todos los partidos.

Esta mayor conciencia pública por los temas medioambientales y la clase de ejemplos sobre contaminación del agua citados anteriormente han llevado a un significativo aumento de la carga de trabajo para las empresas de ingeniería civil interesadas en los estudios de viabilidad y previsión relacionados con la calidad del agua en costas, estuarios, ríos y embalses. Por ejemplo, el interés público y las protestas han llevado a que cada vez más lugares sean analizados para la implantación de emisarios submarinos, etc., así el ingeniero civil ha tenido que variar sus habilidades para conseguir un entendimiento general de complejos procesos hidrodinámicos, meteorológicos, químicos, biológicos y ecológicos.

FALTA DE PAUTAS A SEGUIR

Cuando se abordan muchos de estos problemas hidromedio ambientales y ecológicos, el ingeniero civil se suele encontrar con la dificultad adicional de que no existen unas pautas que ayuden a valorar el impacto de un determinado proyecto sobre el medio ambiente. Además, también hay escasas guías técnicas, o bien son poco claras en los libros técnicos o en las comunicaciones publicadas.

Por ejemplo, en el proyecto y diseño de un gran emisario submarino, el ingeniero civil tiene que diseñar éste de tal manera que sea lo suficientemente grande para asegurar que las concentraciones de efluente a lo largo de la costa estén por debajo de niveles tolerables, mientras que, por otra parte, si la desembocadura es demasiado grande entonces la estructura será demasiado amplia e innecesariamente cara. En los libros no existen soluciones que determinen la longitud óptima de un vertedero en un sitio determinado. Esta dependerá de parámetros como: topografía local y geometría costera, la profundidad en el punto de descarga, el caudal saliente, el diseño de la boca de salida, la diferencia de densidad

entre la descarga y el agua que la recibe, la dirección y velocidad del viento predominante, el alcance de las mareas locales, la latitud del lugar y la rotación de la tierra y las características de rugosidad del lecho marino.

Para ayudar al ingeniero civil a mejorar el diseño de tales estructuras, con el menor impacto medioambiental y un costo bajo, se han utilizado modelos como herramientas de ingeniería adicionales. Tradicionalmente, estos estudios de valoración de los efectos en el medio ambiente se han abordado utilizando modelos físicos en escala, situados en grandes laboratorios de hidráulica. No obstante, los modelos físicos tienen una serie de importantes desventajas y los rápidos avances en la tecnología de ordenadores durante los diez últimos años han permitido a los ingenieros civiles que se planteen el utilizar modelos hidráulicos matemáticos o numéricos. Sin embargo, estos modelos también tienen sus limitaciones, particularmente si están en manos de usuarios sin experiencia.

MODELOS FISICOS - MODELOS MATEMATICOS

La principal desventaja de utilizar modelos físicos para estudios sobre los efectos medioambientales es una limitación técnica. Por ejemplo, al modelar y predecir los niveles de concentración en la costa del effluente de aguas residuales en un vertedero en el mar, el ingeniero civil, cuando utiliza un modelo físico para determinar la situación óptima de la boca de descarga, adoptará diferentes parámetros adimensionales para reducir a escala la geometría de la cuenca, batimetría y características de la corriente. Sin embargo, el nivel de turbulencia (esto es el proceso de mezcla predominante) será considerablemente menor en el modelo que en el prototipo correspondiente, mientras que los procesos químicos y biológicos y niveles de descomposición de sólidos en el modelo serán los mismos que para el prototipo. Esta imposibilidad para simular correctamente tanto la turbulencia como el grado de descomposición en el modelo físico significa que las predicciones sobre el modelo no podrán reflejar con exactitud las condiciones reales del prototipo. En algunos casos, en particular cuando existen corrientes de recirculación, los resultados del modelo físico podrán ser enormemente erróneos. Sin embargo, para los estudios de modelos matemáticos todos los parámetros se modelan en escala de prototipo y, por tanto, la turbulencia, los procesos químicos y biológicos y los niveles de descomposición no se distorsionan al medirlos.

Los modelos físicos son generalmente mucho más caros que los matemáticos. Necesitan de gran número de recursos de laboratorio, equipos electrónicos sofisticados y personal técnico especializado. Generalmente se puede disponer de estas facilidades únicamente a través de organismos especializados, tales como el HR Wallingford, en el Reino Unido. Los modelos físicos también son rígidos, con un alcance de cambios geométricos y topográficos que requieren modificación de formas y toma de datos para cada uno de los cambios. Por el

contrario, si se cambia la geometría o topografía en un modelo matemático generalmente sólo necesita cambiar varios valores numéricos antes de volver a poner en marcha el modelo.

Otro inconveniente de los modelos físicos es que no se pueden transportar. No se puede transportar al extranjero un modelo que se construye para un cliente de fuera y no siempre es posible para el cliente visitar el laboratorio. En cambio en un estudio del modelo matemático, el modelo y el software de todo tipo de gráficos de alta calidad se pueden distribuir al momento por medio de disquetes. Por tanto, se puede utilizar el modelo en un ordenador personal compatible IBM para que clientes y políticos lo vean en sus propios despachos y países, etc.

Los modelos físicos tampoco son adaptables. Por ejemplo, un modelo físico grande de parte del litoral español no se puede utilizar para otro litoral. Sin duda habría que construir un nuevo modelo si se hace un estudio similar para otro litoral. En el caso del modelo matemático, se puede utilizar el mismo modelo para cualquier costa y el modelo creado para un estudio de costa determinado se podrá guardar indefinidamente en un disquete.

Una vez destacadas las ventajas de los modelos matemáticos, también señalaremos los inconvenientes. Además de que requieren un alto nivel de habilidad técnica, no fácilmente asequible para la mayoría de los organismos, los modelos matemáticos se utilizan para resolver un conjunto de ecuaciones diferenciales que rigen un proceso. Sin embargo, la solución real del flujo y de los niveles de transferencia de contaminantes en un estuario, etc., depende de cuál sea exactamente la solución de estas ecuaciones y de si las ecuaciones propiamente dichas reflejan las condiciones físicas reales en el estuario. Cuando se modela el flujo y las condiciones de calidad del agua en cualquier estuario todavía quedan una serie de dudas como: 1) fluidodinámicas, por ej., turbulencia; 2) en los procesos físicos, por ej., erosión y depósito de sedimentos cohesivos; 3) en los procesos químicos y biológicos relativos a los parámetros de la calidad del agua, por ej., los niveles de descomposición para nitratos; 4) en los métodos numéricos, por ej., el tratamiento de discontinuidades matemáticas, y 5) la inclusión de condiciones de contorno, por ej., batimetría, corrientes, niveles de agua y rugosidad del lecho.

METODO DEL MODELO MATEMATICO

El tipo de modelos matemáticos que los ingenieros civiles utilizan generalmente para participar en los estudios de valoración de los efectos sobre el medio ambiente se basan en solucionar las ecuaciones diferenciales de masa (o continuidad), impulso en dos direcciones ortogonales en el plano horizontal, y de transporte para cada uno de los parámetros de calidad de agua. Las ecuaciones de flujo se obtienen al integrar las ecuaciones tridimensionales de Navier-Stokes sobre la profundidad de la columna de agua (ref. 4), tomando en cuen-

ta las ecuaciones de los efectos de la rotación de la tierra, acción del viento, rozamiento en el lecho y difusión turbulenta. Estas tres ecuaciones, es decir, la de continuidad, y las de impulso en las direcciones x e y , describen la variación de tres variables desconocidas, a saber, el nivel de agua sobre o por debajo del nivel de comparación (ζ) y los componentes x e y de la velocidad (U, V) sobre la región de interés para todo x, y, t (tiempo). Para la evolución de los solutos individuales importantes para la calidad del agua, la ecuación de transporte correspondiente se integra sobre la profundidad de la columna de agua, con la inclusión de los efectos de la difusión turbulenta, dispersión y difusión inducida por el viento. La descomposición y las interacciones químicas también se incluyen en las ecuaciones.

Estas ecuaciones se solucionan generalmente utilizando la técnica de las diferencias finitas. Este método se basa en el establecimiento de una malla regular de celdas cuadradas sobre la región en cuestión y

aproximando las ecuaciones utilizando las series de Taylor y solucionándolas para cada celda cuadrada de lados Δx , véase la figura 1. Así, para cada celda hay cuatro ecuaciones o más, además de las ecuaciones de continuidad (o conservación de masa), impulso en las direcciones x e y , y transporte para cada sustancia disuelta Φ_i (ref. 5). El número y tamaño de las celdas cuadradas variará según el tamaño del campo, pero generalmente, un estudio puede constar de un campo de 60×60 celdas cuadradas, de 100×100 m cada una. La profundidad local por debajo de los niveles de comparación se refleja en las esquinas de cada celda y la altura de rugosidad del fondo se especifica en el centro de cada cuadrado. Las ecuaciones se resuelven bien explícita o implícitamente para cada celda cuadrada, en cada intervalo de tiempo, siendo típicamente el intervalo de tiempo 30 s. Las simulaciones del modelo se llevan a cabo generalmente para varias mareas (entre 15 y 20), con el nivel de agua (ζ), los componentes de velocidad (U, V) y las sustancias disueltas (Φ_i) que se calculan en el centro o lados de cada celda, para cada intervalo de tiempo. Estos modelos se pueden utilizar en un ordenador personal compatibles IBM, y se necesita como máximo dos días de tiempo de procesador para simular de 15 a 20 mareas en tiempo real (ref. 6).

INVESTIGACION EN MODELO MATEMATICO

Un proyecto de investigación típico realizado por el autor y cuyo objetivo es mejorar la precisión de los modelos matemáticos para predecir flujos y procesos de calidad del agua en costas y estuarios, es el que se refiere a vórtices por marea en cuencas cerradas. La existencia de vórtices por marea es importante para los ingenieros de costas o planificación por el efecto sobre el depósito de sedimentos, mezcla de contaminantes y el emplazamiento de los emisarios submarinos en el mar, etc. Tales vórtices dependientes del tiempo son procesos complejos con un flujo hidrodinámico que no es fácil de modelar numéricamente y para los que las predicciones de modelo físico llevan a menudo a resultados erróneos, en especial cuando se utilizan modelos con distorsión de escalas.

Los resultados de un estudio analítico de la ecuación de transporte de vorticidad integrada en profundidad que describe los vórtices por marea (ref. 7) han mostrado que son importantes las aceleraciones advectivas y las tensiones turbulentas de fricción lateral y que las inclinaciones del lecho pueden ser relevantes para generar tales remolinos si se usa una ley cuadrática para la fricción en el lecho. Por tanto, es esencial asegurar que la topografía compleja del lecho se modele con exactitud en las simulaciones prácticas del modelo numérico.

Dos modelos de turbulencia específicos se han considerado y comparado para tratar de modelar con precisión los vórtices por marea. El primero utiliza un modelo de longitud de mezcla de dimensión cero, con una representación empírica de la turbulencia en interfaces de fricción libre; el segundo es el modelo de turbulencia

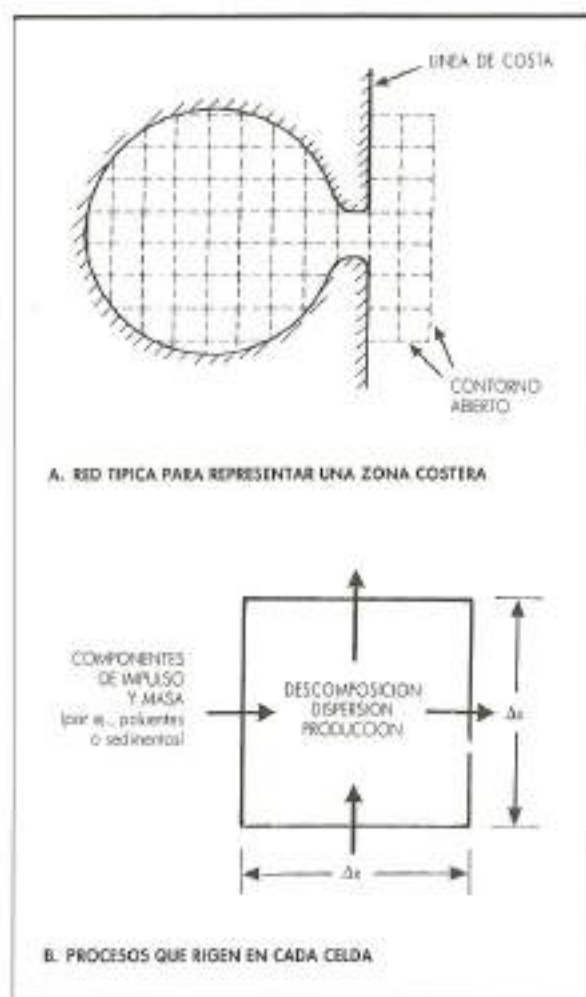


FIGURA 1. Representación de la red del modelo matemático.

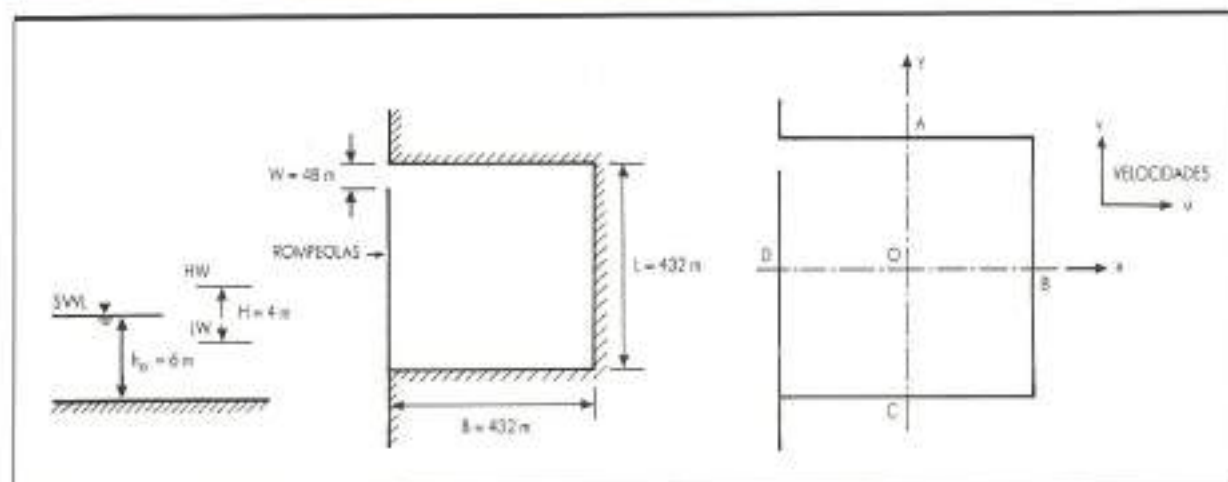


FIGURA 2. Representación esquemática de un puerto prototipo idealizado, mostrando rango de marea, calado medio y ejes.

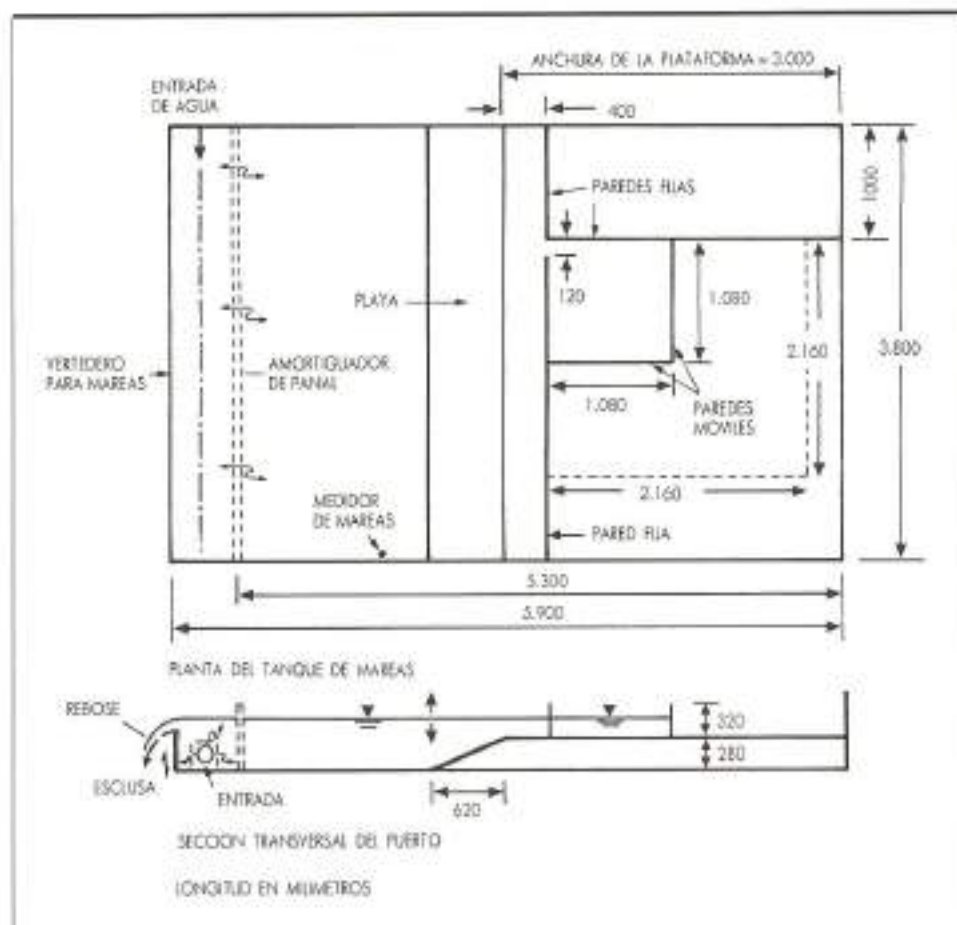


FIGURA 3. Representación esquemática de tanque de mareas en laboratorio y configuración de puerto.

más complejo de dos ecuaciones $k-\epsilon$ no estacionarias. La representación numérica de las ecuaciones diferenciales $k-\epsilon$ dependientes del tiempo mostró problemas de estabilidad utilizando un esquema de diferencias finitas implícito con precisión de segundo orden y un nivel intolerable de difusión artificial cuando se utilizaba un esquema con precisión de primer orden.

Cuando se probaron los diferentes modelos de turbulencia, el modelo matemático se aplicó a tres estudios: 1) circulación inducida por mareas en un puerto de laboratorio con forma rectangular; 2) circulación por vórtices de marea en el sotavento de la isla de Rattray, Australia, y 3) circulación por mareas en el puerto de Port Talbot, Reino Unido.

En la primera de estas aplicaciones se tomaron en laboratorio medidas detalladas de los perfiles de velocidades promediadas en vertical a lo largo de los ejes centrales AOC y DOB como se muestra en la figura 2. Las medidas de velocidad se tomaron en intervalos de 10 s a 1 minuto a cada lado del nivel medio del agua para mareas sinusoidales de período 708 s en modelo. El puerto del modelo se situó en el extremo de una cuenca de marea, como se muestra en la figura 3, con un vertedero oscilante controlado por ordenador y generando mareas de amplitud y período variable. Los puertos del modelo en estudio eran modelos de laboratorio con escalas distorsionadas de un puerto imaginario que en prototipo sería un cuadrado, de 432×432 m de lon-

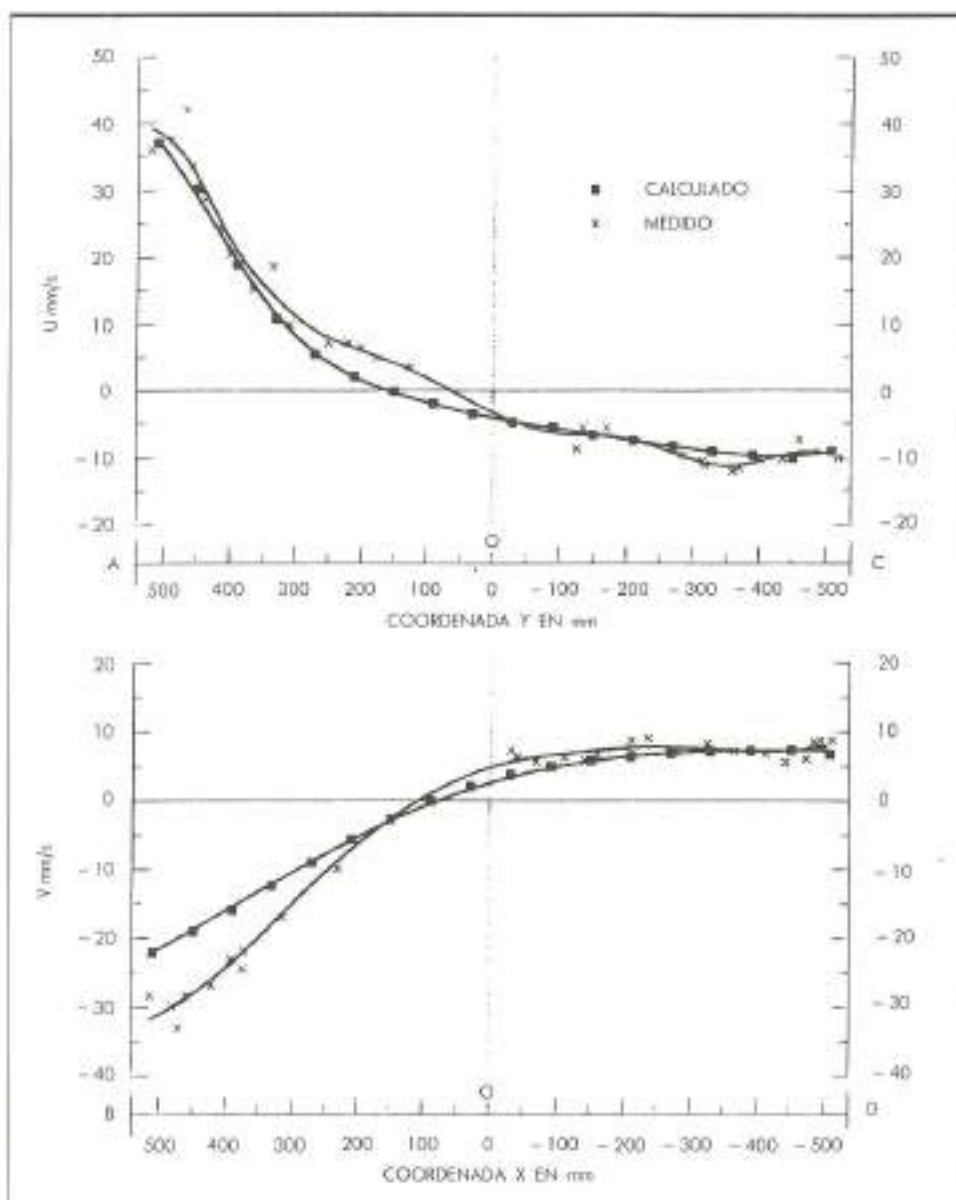


FIGURA 4. Valores de la velocidad a lo largo de los ejes al nivel medio de marea usando un modelo $k-\epsilon$ y midiendo.

gitud, con una superficie resultante de 18,7 ha. La escala horizontal se hizo variar de 1:200 a 1:400 y la escala vertical de 1:12 a 1:3,125. En Falconer y YU (ref. 7) se dan más detalles de la configuración de laboratorio y del método experimental.

El espaciado de la malla en el modelo numérico era generalmente 60 m y el período de tiempo se tomaba de tal manera que el máximo número de Courant fuese aproximadamente 8. Las comparaciones resultantes de las distribuciones de velocidad calculadas y medidas, tanto con el $k-\epsilon$ como con los modelos de longitud de mezcla, se muestran en las figuras 4 y 5, junto con las distribuciones de velocidad y sustancias disueltas y las

distribuciones de viscosidad de remolino recogidas en las figuras 6 y 9.

Las principales consecuencias que resultan del estudio se pueden resumir de la siguiente manera:

- A. Las tensiones turbulentas de fricción lateral y las aceleraciones advectivas eran extremadamente importantes para modelar los vórtices por marea.
- B. La influencia de la batimetría sobre la estructura y fuerza de los remolinos también era particularmente importante.
- C. El uso de una ley de fricción cuadrática daba lugar a componentes tanto de generación de vorticidad como de su difusión.

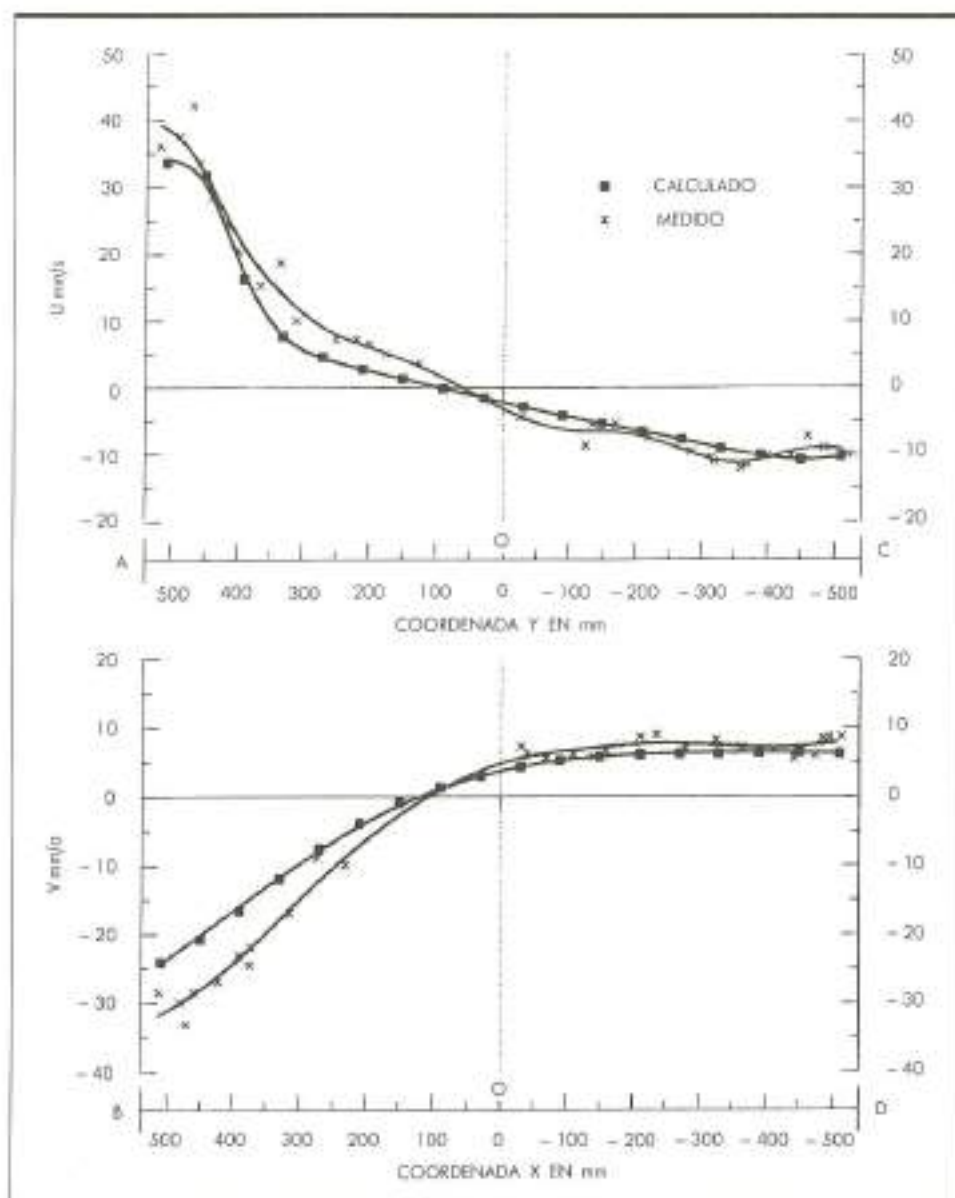


FIGURA 5. Valores al nivel medio de marea de la velocidad a lo largo de los ejes usando un modelo modificado de longitud de mezcla y midiendo.

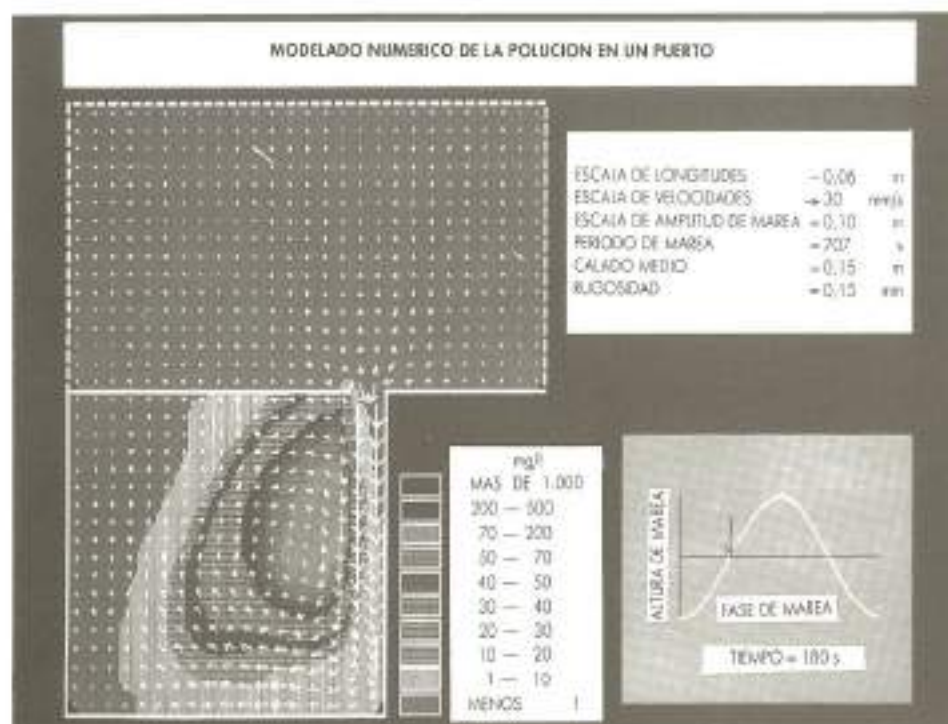


FIGURA 6. Velocidad calculada y distribución de solutos en un puerto cuadrado al nivel medio de marea tras 0,25 mareas.

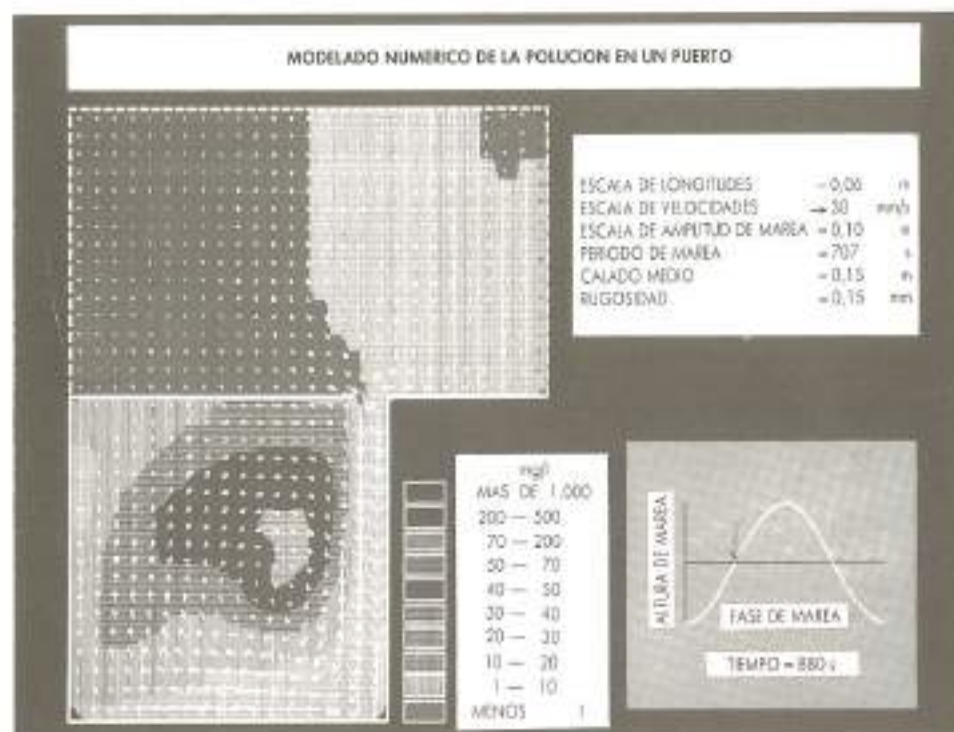


FIGURA 7. Velocidad calculada y distribución de solutos en un puerto cuadrado al nivel medio de marea tras 1,25 mareas.

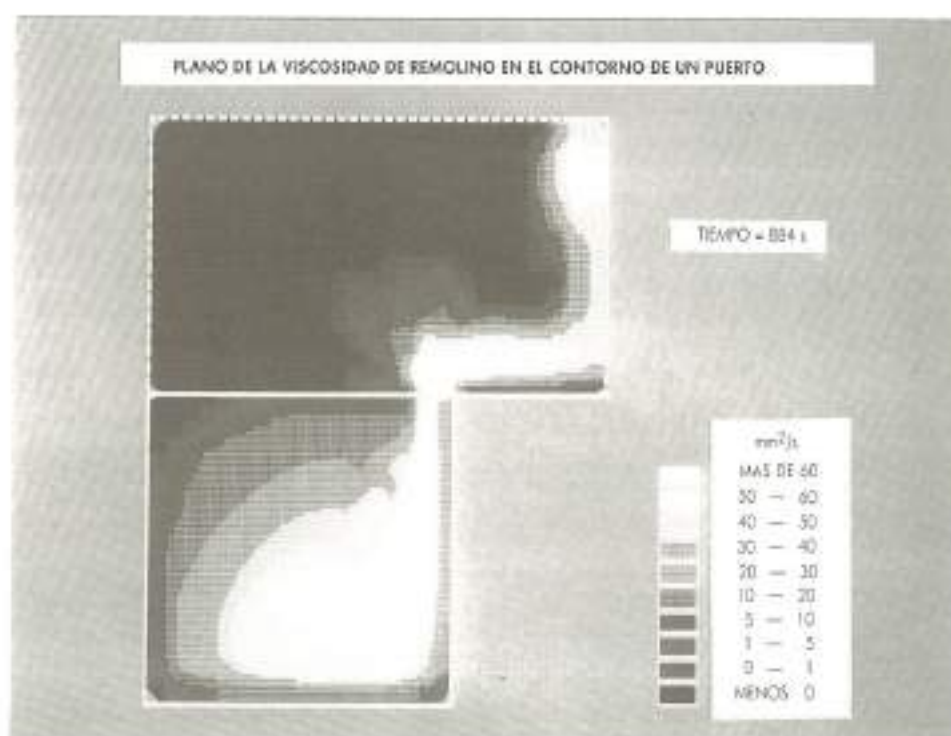


FIGURA 8. Distribución prevista para la distribución de la viscosidad de remolino en un puerto cuadrado al nivel medio de marea usando el modelo k-ε.

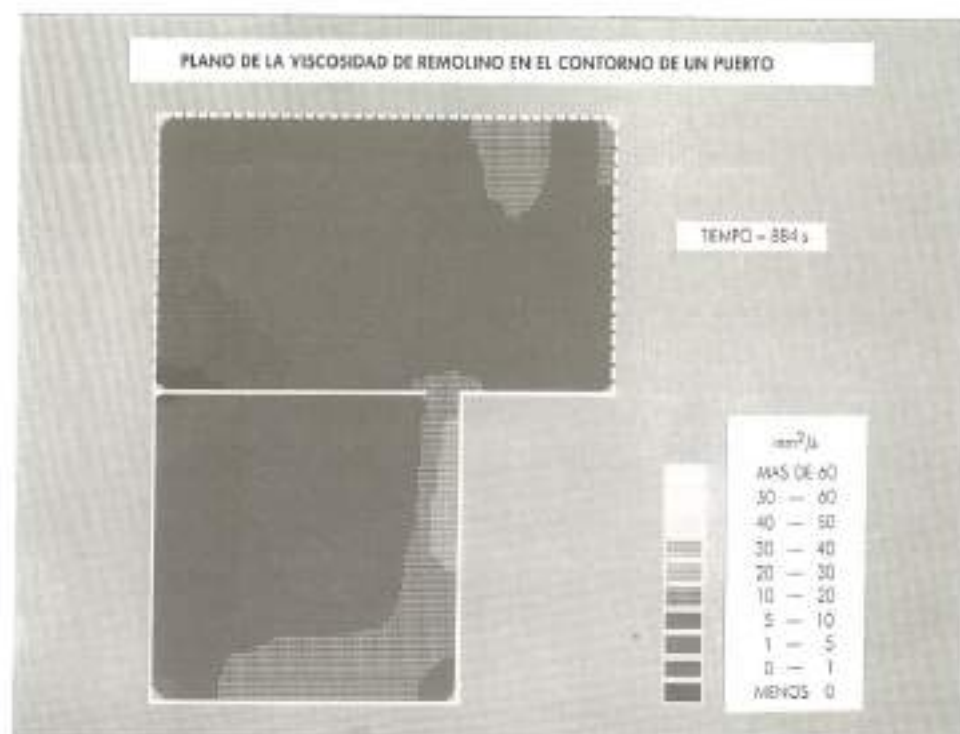


FIGURA 9. Distribución prevista para la distribución de la viscosidad de remolino en un puerto cuadrado al nivel medio de marea usando el modelo modificado de longitud de mezcla.

D. La elección del tamaño de las celdas era de suma importancia para reproducir con precisión los vórtices por marea.

E. En un análisis analítico y numérico del modelo sobre la influencia que los distintos términos de las ecuaciones de movimiento ejercen sobre la hidrodinámica de los remolinos de marea, las diferencias en las predicciones del modelo numérico de remolinos de marea para puentes rectangulares en el prototipo y sus respectivos modelos físicos han planteado interrogantes sobre conveniencia de utilizar modelos físicos distorsionados.

F. Se comprobó que las tensiones turbulentas de fricción y la condición de contorno de no-deslizamiento tenían un marcado efecto sobre la estructura del remolino de marea cercano a la pared, tanto en el prototipo como las simulaciones en el modelo físico.

G. Las ecuaciones de turbulencia $k-\epsilon$ variada llegaban a ser inestables al utilizar los esquemas tradicionales de diferencias finitas y se tuvieron que adoptar esquemas con precisiones de orden mayor, tales como QUICK y EXQUISITE.

H. Las soluciones del modelo de turbulencia $k-\epsilon$ dieron unas distribuciones de viscosidad de remolino significativamente diferentes de las que se habían estimado utilizando modelos de longitud de mezcla simples. A pesar de que las dispareas distribuciones de viscosidad de remolino reflejaban muy poca diferencia en las predicciones del campo de velocidades, el efecto era mucho más pronunciado en la difusión turbulenta de sustancias disueltas, fueran éstas conservativas o no.

I. Finalmente, el modelo refinado de turbulencia variada reflejaba un importante grado de acuerdo entre los resultados de laboratorio y las predicciones del modelo numérico.

CONCLUSIONES

Se dan detalles de las razones hidro-ecológicas del creciente interés público sobre los problemas de la contaminación del agua y el correspondiente uso cada vez mayor que hacen los ingenieros y científicos del agua de modelos hidráulicos matemáticos para contribuir con su ayuda a los estudios de impacto ambiental y a aportar consideraciones de diseño que resulten en una mejor calidad del agua.

Se ha citado un ejemplo de una investigación para estimar la estructura de los vórtices por marea en zonas costeras cerradas utilizando un modelo refinado de turbulencia. Los resultados de este estudio han demostrado que aunque el modelo de turbulencia no ha tenido un efecto significativo sobre la gran estructura de flujo de marea dentro de un puerto rectangular, se han podido predecir con más exactitud importantes detalles de flujo y, en particular, el coeficiente de difusión de la turbulencia es más preciso.

AGRADECIMIENTO

El presente estudio de investigación citado se llevó a cabo con el Dr. Li Guyl, en la actualidad Modelador Matemático Senior para Posford Duvivier y con anterioridad investigador en la Universidad de Bradford, y fue financiado por el Consejo de Investigaciones sobre Ciencia e Ingeniería, Reino Unido.

BIBLIOGRAFIA

- SCOTT, A. (1988). «Sewage Pollution», Marine Conservation, primavera, págs. 173-174.
- FALCONER, R. A., y TEBBUTT, T. H. Y. (1986). «A Theoretical and Hydraulic Model Study of a Chlorine Contact Tank», Comunicaciones de la Asociación de Ingenieros Civiles, parte 2, vol. 81, junio, págs. 255-276.
- GRIZZLE, J. M.; MELIUS, P., y STRENGTH, D. R. (1984). «Papillomas on Fish Exposed to Chlorinated Wastewater Effluents», Revista del Instituto Nacional del Cáncer, vol. 73, noviembre, págs. 1133-1142.
- FALCONER, R. A. (1976). «Mathematical Modelling of Jet-Forced Circulation in Reservoirs and Harbours», tesis presentada en la Universidad de Londres para el Título de Doctor en Filosofía, noviembre, pág. 237.
- FALCONER, R. A. (1986). «A Two-Dimensional Mathematical Model of the Nitrate Levels in an Inland Natural Basin», comunicaciones de la Conferencia Internacional sobre Modelado de la Calidad del Agua el Medio Ambiente Natural Continental, Ingeniería de Fluidos BHRA, Bournemouth, artículo J1, junio, págs. 325-344.
- FALCONER, R. A., y JONES, J. G. (1987). «PCs Move in on Water Quality Modelling», Boletín sobre el Agua, n.º 287, diciembre, págs. 8-9.
- FALCONER, R. A., y YU, G. P. (1991). «The Effects of Depth, Bed Slope and Scaling on Tidal Currents and Exchange in a Laboratory Model Harbour», Comunicación de la Asociación de Ingenieros Civiles, parte 2, Investigación y Teoría, vol. 91, septiembre, págs. 561-576.