

ESTUDIO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE LA CONTAMINACIÓN EN AGUAS COSTERAS

A. Rodríguez¹, A. Sánchez-Arcilla¹, E. Bahía¹, J.M. Redondo²,
F. Collado¹

1 Lab. Ing. Marítima, (2) Dept. Física Aplicada,
ETSECCPB, Univ. Politécnica de Catalunya

2 Lab. de Dinámica de Fluidos (Dep. de Física Aplicada)
ETSECCPB, Univ. Politécnica de Catalunya

RESUMEN: En este trabajo se presentan resultados numéricos y experimentales de la dispersión de contaminantes y trazadores en el litoral Mediterráneo. Se han utilizado dos modelos hidrodinámicos para simular la circulación horizontal producida por viento y oleaje en la plataforma y la zona de rompientes, respectivamente. Un modelo 3D de dispersión en "el campo cercano" suministra las condiciones iniciales al modelo 2D de dispersión local en el "campo lejano". Se presentan dos casos de estudio: la dispersión de trazadores en la zona de rompientes (Delta del Ebro) desde el punto de vista numérico y experimental; y la simulación de la dispersión de contaminantes urbanos - bacterias- provenientes del principal emisario submarino de Barcelona, mediante la aplicación de una secuencia de modelos numéricos. La comparación entre los experimentos y los resultados numéricos en la zona de rompientes es buena, mientras que las predicciones de contaminación en litoral cercano al emisario manifestaron la importancia de modelar con precisión los efectos de flotabilidad en el penacho o pluma. Además, se han simulado varias configuraciones de descarga, comprobándose que solo el nuevo emisario permite un grado de dilución acorde con la normativa vigente.

INTRODUCCIÓN

El mar Mediterráneo es un importante eco-sistema cuyas aguas tienen simultáneamente problemas de contaminación y un intenso uso turístico. Estas características son importantes principalmente en la zona cercana a la costa, donde los mecanismos que gobiernan la dispersión son complejos debido a los efectos de la rotura del oleaje y a la interacción no lineal entre olas y corrientes.

La solución integral de los problemas ambientales costeros requiere elementos provenientes de campos del conocimiento muy diversos, destacándose entre ellos la hidrodinámica, las características biológicas y las químicas tanto del cuerpo de agua como de los efluentes involucrados. La simulación de la dispersión de contaminantes en la costa necesita de mediciones detalladas y de la calibración de modelos numéricos mediante casos simples que luego permiten mejorar el conocimiento de los procesos físicos y al mismo tiempo poder realizar predicciones numéricas.

Artículo recibido el **12 de abril de 1995** y aceptado para su publicación el **10 de mayo de 1995**. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo. En el caso de ser aceptadas, las discusiones serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores en el primer número de la revista que aparezca una vez transcurrido el plazo indicado.

Uno de los primeros estudios de los procesos de mezcla en la zona de rompientes fue realizado por Harris et al. en 1963. Desde entonces, muchos investigadores han continuado estudiando la turbulencia y la mezcla inducida por la rotura del oleaje, realizando tanto trabajos teóricos (Battjes, 1975; Zeider, 1976; Svendsen, 1987), como experimentales (Crickmore, 1972; Horikawa et al., 1978; Nadaoka and Hirose, 1986). Estos trabajos previos han mostrado la complejidad de los fenómenos de mezcla macro-turbulenta e interacción no lineal entre turbulencia, olas y corrientes. Esta complejidad es la principal razón por la cual, aún después de 20 años de investigaciones, no se disponga de una formulación completa para describir la dispersión en la zona de rompientes.

En este trabajo se presentan dos casos de estudio: el primero muestra la dispersión de trazadores en la zona de rompientes (Delta del Ebro) incluyendo mediciones y modelado; el segundo caso presenta la simulación de la dispersión de los efluentes provenientes del principal emisario submarino de la ciudad de Barcelona.

MODELADO NUMERICO

Modelo Hidrodinámico

En el Laboratorio de Ingeniería Marítima de la Escuela de Caminos de Barcelona (Universidad Politécnica de Cataluña) se han desarrollado diversos modelos hidrodinámicos durante los últimos 15 años. Uno de ellos (NEARCIR-Q3D), se ha utilizado en este trabajo para simular el campo de velocidades como "input" del modelo de dispersión. Este modelo ha sido extensamente calibrado previamente (para detalles del proceso de validación ver lista de referencias).

Para simular la circulación inducida por el oleaje en la zona de rompientes (caso de estudio 1) se utiliza el modelo NEARCIR (e.g. S.Arcilla et al 1990/92). Este modelo consta de tres módulos, el primero, calcula la propagación del oleaje y está basado en el principio de conservación cinemático y de la acción de las olas y utiliza como condiciones de contorno en aguas profundas la altura y la dirección características del oleaje.

El segundo módulo resuelve las ecuaciones de conservación de masa y momentum verticalmente integradas suponiendo una "tapa rígida", ecuaciones 1 y 2, incluyendo los términos impulsores generados por la rotura del oleaje.

- Continuidad:

$$\frac{\partial U h}{\partial x} + \frac{\partial V h}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

- Momentum en dirección x (análoga para y):

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} U^2 + \frac{\partial}{\partial y} UV + g \left[\frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\partial h}{\partial x} \right] = f V + F_x^+ \\ \nu \left[2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial y} \right] - \frac{g}{C^2} \frac{(U^2 + V^2)^{1/2}}{h} U \quad (2)$$

donde h es la profundidad; U y V son las velocidades verticalmente integradas a lo largo de los ejes x , e y respectivamente; f es el parámetro de Coriolis; C es el coeficiente de Chezy; ν es la viscosidad turbulenta horizontal y F_x^+ es un término impulsor (e.g. viento u oleaje) en las ecuación de momentum. La tensión inducida por viento es calculada con la siguiente expresión:

$$\tau_w = \rho K_w W |W| \quad (3)$$

donde W es la velocidad del viento a 10 m de la superficie del mar y K_w un coeficiente de calibración adimensional (ver Dean y Dalrymple, 1984).

Para resolver este sistema de ecuaciones, son necesarios algunos "submodelos de cierre" como la tensión por fricción con el fondo y la difusividad turbulenta. Para el primero se parametrizó y acopló mediante un esquema iterativo un submodelo de capa límite turbulenta (ver detalles en Fredsoe, 1984 y S.Arcilla et al., 1992). Para la difusión horizontal se emplean expresiones standard (e.g. Deguchi et al., 1992) y calibración utilizando los perfiles de velocidad medidos.

La técnica de solución emplea un esquema explícito en diferencias finitas basado en una malla tipo MAC ("Marker-And-Cell"). La misma malla es utilizada por el módulo de propagación. El módulo de circulación 2DH recibe del primer módulo el tensor de radiación y el nivel medio modificado por el oleaje. El tercer módulo permite calcular la estructura vertical del campo de velocidades con una aproximación Q-3D, por lo que sus resultados no son presentados en esta aplicación bidimensional 2DH.

El modelo hidrodinámico suministra al modelo de dispersión el campo de velocidades incluyendo las distribuciones espaciales de tensiones turbulentas horizontales (en el fondo y en la superficie si corresponde) que permiten estimar los coeficientes de dispersión en la malla de cálculo.

Modelo de Dispersión

El modelo de dispersión desarrollado, **DISPER**, es una versión mejorada del modelo Lagrangiano propuesto inicialmente por Holly y Pollatera (1984), y modificado por Carreras y Menendez (1990).

La ecuación de convección-difusión 2DH que se resuelve es la siguiente (EDP):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U_i \frac{\partial C}{\partial x_i} - \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x_i} (h K_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j}) = -\frac{C}{T_d} \quad (4)$$

Con $i, j = 1, 2$; U_i : corrientes 2DH, C : concentración 2DH, h : profundidad, K_{ij} : coeficientes de dispersión horizontales y T_d : tiempo de decaimiento característico del "constituyente" (o contaminante al que se refiera C).

La solución numérica está basada en una técnica de desdoblamiento ("splitting") entre los diferentes procesos involucrados: advección por el flujo medio, dispersión (difusión turbulenta y advección diferencial por gradientes espaciales del flujo medio) y finalmente un posible decaimiento. La variación temporal es resuelta utilizando un esquema en diferencias finitas

explícito. Los términos convectivos se resuelven mediante el método de las características, utilizando una interpolación bilineal para la velocidad en cada celda. Los términos difusivos son resueltos aplicando una aproximación analítica que asume una distribución espacial Gaussiana de la concentración. Esta aproximación, junto con la hipótesis de coeficientes de dispersión suavemente variables en la zona donde los gradientes de concentración son importantes, limitan la aplicación del modelo a regiones "locales" donde las manchas admiten formas elípticas. La ecuación en derivadas parciales inicial es transformada en dos sistemas desacoplados de ecuaciones lineales en derivadas ordinarias, que son resueltos sucesivamente mediante un método de Runge-Kutta clásico de sexto orden. Finalmente, el término de decaimiento es evaluado en forma directa, ya que es supuesto como un proceso de primer orden.

Para la validación del modelo se compararon los resultados numéricos con dos soluciones analíticas de la ecuación 4, tomadas de Holly y Pollatera (1984) y Ozmidov (1990) respectivamente. A modo de ilustración, se muestra la comparación para el caso de una fuente instantánea puntual en un flujo no uniforme. En este caso, propuesto inicialmente por

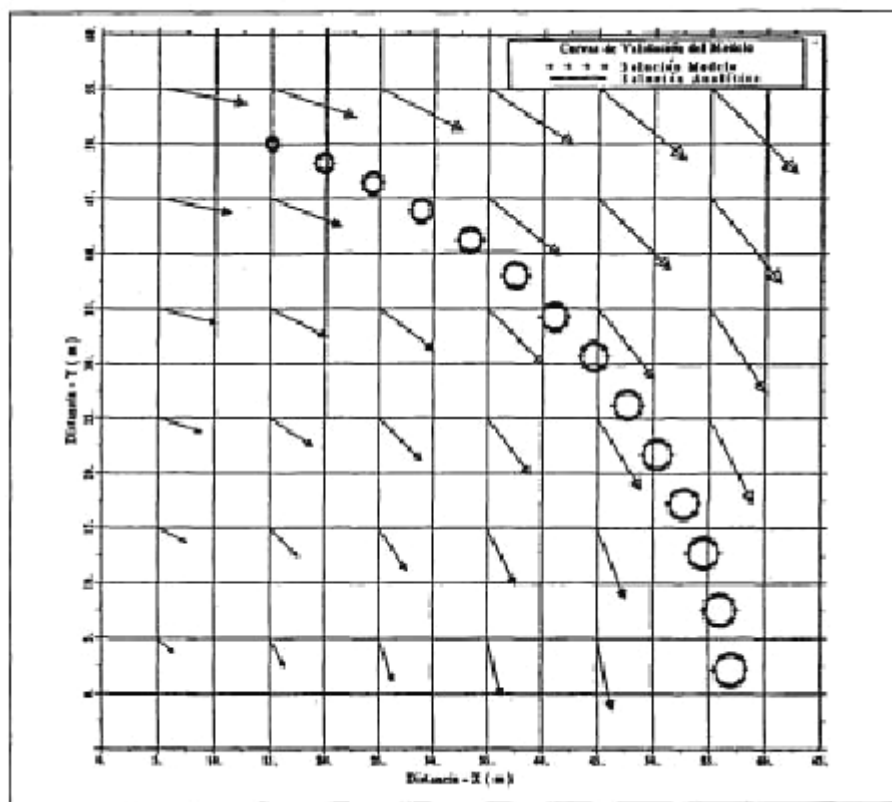


Figura 1: Comparación del modelo **DISPER** (cruces) y la solución analítica de Okubo (línea) para una fuente puntual instantánea en un flujo circular no uniforme.

Okubo en 1966, se considera una concentración media en la vertical dada por la expresión siguiente:

$$C(x,y,t) = \frac{Q}{4\pi K_h P(t)} \exp\left[-\frac{M_1(t)x^2 + 2M_2(t)xy + M_3(t)y^2}{4K_h P^2(t)}\right] \quad (5)$$

Donde Q es el caudal de la fuente, K_h es un coeficiente de difusión horizontal y P, M_1 , M_2 , y M_3 son funciones del campo de velocidad de naturaleza hiperbólicas, (ver detalles en Ozmidov, 1990).

La Figura 1 muestra comparación entre resultados numéricos (cruces) y la solución analítica (línea) dada por (ec. 5). Como puede observarse ambas soluciones aparecen superpuestas debido al buen ajuste obtenido.

El modelo de dispersión utiliza como "inputs" la batimetría, el campo de velocidades y los coeficientes de dispersión y decaimiento. La batimetría ha sido medida en el caso de estudio 1 y digitalizada de cartas náuticas en el caso 2. El campo de velocidades de corrientes se ha obtenido usando el modelo hidrodinámico mencionado, más mediciones en el caso 1. El decaimiento bacteriano es opcionalmente estimado a partir de formulaciones estándar (e.g. Mancini, 1978) o a partir de valores medidos.

Los coeficientes del tensor de dispersión K_{ij} se calculan mediante las expresiones dadas por la ec. 6, similares a las clásicas propuestas por Eider (1959). Una ventaja de la presente formulación es que no es necesario estimar explícitamente los términos cruzados, ya que sólo se precisan las componentes paralela y perpendicular al flujo (K_p) y (K_c). Esto se debe a que el método Lagrangiano sigue las propiedades de las manchas a lo largo de las líneas de corriente. Los valores de K_p y K_c se estiman, en base a un análisis dimensional, mediante:

$$\begin{aligned} K_p &= \beta_p h u_* \\ K_c &= \beta_c h u_* \end{aligned} \quad (6.a,b)$$

donde β_p y β_c son coeficientes numéricos y u_* es la velocidad de corte.

Para calcular la concentración total, C_T , en plumas o inyecciones continuas (caso 2), se asimilan estas inyecciones a una sucesión de descargas puntuales (manchas) sucesivas. Las soluciones individuales se superponen de la siguiente manera:

$$C_T(x,y,t) = \sum_{j=1}^n C(x,y,t_j) \quad (7)$$

En esta sumatoria sólo es preciso incluir los puntos de las manchas cuya distancia al punto (x,y) considerado sea inferior a 4 veces el desvío estándar de la mancha gaussiana "j".

Los resultados de éste modelo han sido comparados satisfactoriamente con datos de campo y valores obtenidos con otros modelos numéricos en condiciones similares. Además, en la fase experimental complementaria del modelo numérico, se ha comenzado a estudiar una formulación para los coeficientes de viscosidad turbulenta y de dispersión horizontal en la ZR. A partir de medidas de la evolución de intensidad en isolíneas y centros de la manchas, los coeficientes antes mencionados pueden ser comparados y calibrados.

Más detalles sobre el modelo DISPER puede encontrarse en Sierra et al. (1994).

CASOS DE ESTUDIO EN EL LITORAL ESPAÑOL

Caso de estudio 1: Experimentos de campo en el Delta del Ebro

Los experimentos de campo se realizaron en la costa mediterránea, concretamente en la Barra del Trabucador del Delta del Ebro (mostrado en la Figura 2), entre el 13 y 17 de Diciembre de 1993. Esta playa fue seleccionada por su geometría cuasi uniforme longitudinalmente, como se puede ver en la figura 3, y la disponibilidad de información previamente obtenida por el LIM-UPC.

El trabajo experimental incluyó la medición simultánea de numerosas variables como: altura dirección y período del oleaje incidente fuera y dentro de la ZR mediante una boya direccional (dwr) y un sensor de altura (wg) combinado con video, respectivamente. El campo de velocidades se midió mediante 6 correntímetros electromagnéticos (emc) y filmación en video de trazadores. El posterior tratamiento digital de las imágenes de los trazadores permitió estudiar la dispersión de contaminantes pasivos. Las mediciones incluyeron también el transporte de sedimentos en suspensión y la batimetría al inicio y final de la campaña.

Para estudiar la hidrodinámica y procesos de mezcla de la ZR se ha utilizado una moderna técnica de procesamiento digital de imágenes (DigImage-1994). Las filmaciones de la superficie del mar se realizaron desde una cámara BN colocada a 20 m de altura. Las imágenes son restituídas para transformar el sistema de coordenadas en pixels a coordenadas topográficas corrigiendo también las distorsiones producidas por la inclinación de la cámara y la lente gran angular. Para calibrar la función de transformación se colocaron numerosas banderas colocadas en la línea de orilla y 50 m mar adentro.

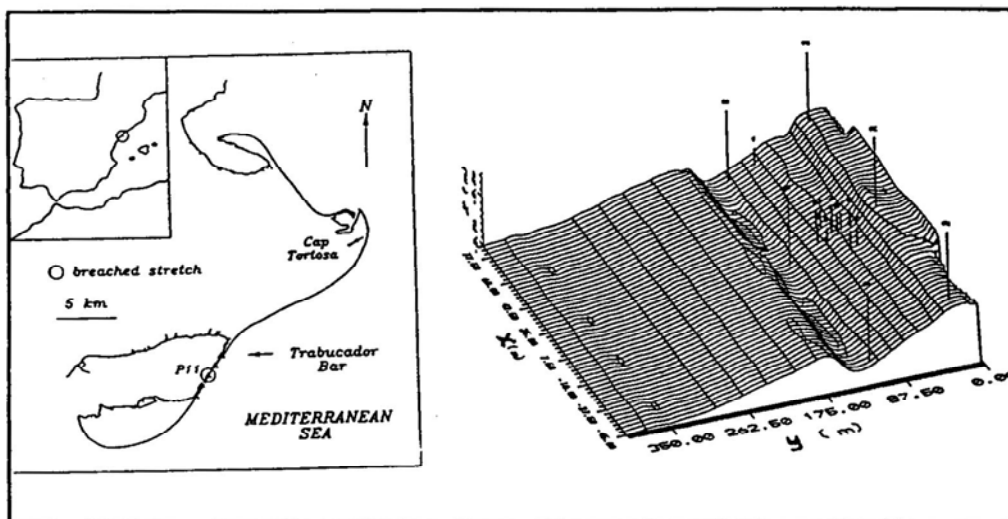


Figura 2 y 3: (Der.) Area del Delta del Ebro y localización de la Barra del Trabucador (P11), (Izq.) Batimetría del área de estudio (P11) el 16/Diciembre/93

El error de ésta función (un polinomio bicuadrático) fue menor a 0.8 m en la dirección y ("cross-shore") y a 0.2 m en x ("longshore"). Respecto de la resolución temporal del sistema de video, ésta varía entre 50 y 25 imágenes por segundo, dependiendo de si se filtran o no las líneas pares e impares ("interlace filtering"). La importancia de conocer la precisión del sistema de tratamiento de imágenes radica en que condiciona la fiabilidad en las mediciones de advección, distorsión y dispersión horizontal de las manchas, a partir de las cuales se quiere caracterizar los coeficientes de mezcla. Más detalles de la aplicación de esta técnica de proceso de imágenes a la hidrodinámica de ZR se presentan en Redondo et al. (1994).

Los trazadores fueron seleccionados después de varias intercomparaciones en campo con diferentes sustancias: fluoresceína, rodamina, KMnO_4 , CaSO_4 y leche. La buena calidad de un trazador depende de su contraste con el color de la superficie y de su

persistencia. Como el contraste depende de varios factores (e.g. turbidez, color del cielo, intensidad de luz, etc.), la selección debe hacerse cuidadosamente. En general se concluyó que la leche y la fluoresceína fueron los más adecuados.

El empleo del video permite la identificación y seguimiento de manchas simultáneas, boyas y espuma, en la zona de rotura y orilla. A partir de estas imágenes se pueden estimar velocidades lagrangianas, características del oleaje, oscilaciones de baja frecuencia y parámetros de dispersión asociados a la turbulencia inducida por la rotura del oleaje (e.g. Figuras 6 y 9). Debido a la intensa mezcla vertical dentro de la ZR, las velocidades lagrangianas obtenidas con las manchas pueden considerarse representativas del flujo medio. Esta representatividad se pudo validar mediante la comparación con las velocidades eulerianas medidas con los correntímetros electromagnéticos.

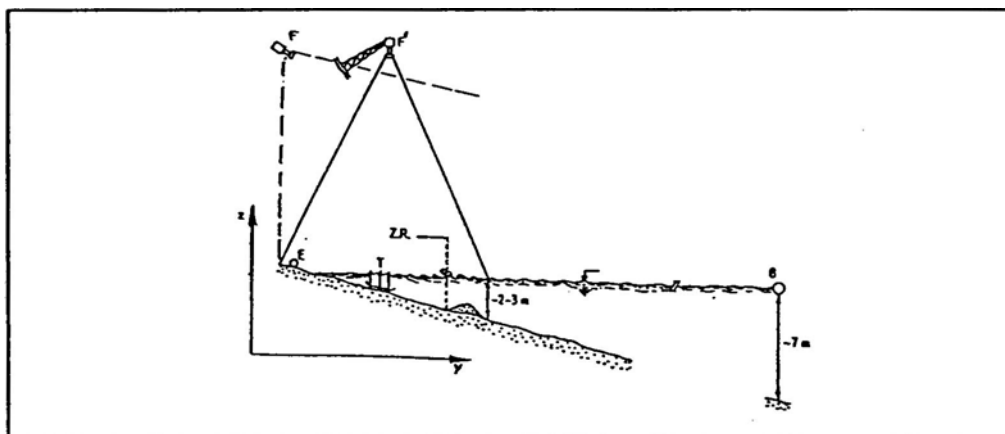


Figura 4: Esquema de medición utilizado: E: estación móvil de adquisición de datos; T: punto de vertido de los colorantes y trineo de arrastre con emc, obs, pst y wg; B: cámara de video.

La Tabla 1 muestra el número de test y un resumen de las condiciones experimentales encontradas (altura de ola "rms" (cm), período del pico espectral, coordenada "cross-shore", calado medio y velocidades horizontales (cm/s)) el 16/Diciembre/93 durante un estado de mar posterior a un temporal de intensidad media. Los tests 5-7 se efectuaron durante la mañana, con un estado de mar cuasi-estacionario, mientras que los tests 8-12 se midieron por la tarde, con un oleaje decreciente en energía. Más información sobre los experimentos realizados durante la campaña DELTA'93/94 y su modelado hidrodinámico puede verse en Rodríguez et al. (1994).

Tabla 1. Condiciones medidas el 16/diciembre/93: corriente longitudinal(V) y transversal("underflow"), verticalmente promediadas

Caso	Medidas		Hidrodinámicas (P11)			
	Hrms (m)	Tp(s)	Y (m)	h (m)	V*(m/s)	U*
5	0.47	7.1	87.9	1.29	0.48	0.15
6	0.38	7.1	73.2	0.80	0.88	0.19
7	0.31	8.0	65.1	0.70	0.66	0.13
8	0.41	7.1	93.5	1.34	0.23	0.08
9	0.40	7.1	79.8	0.70	0.62	0.24
10	0.33	7.1	74.0	0.68	0.60	0.16
11	0.27	8.0	69.5	0.60	0.46	0.11
12	0.18	8.0	60.0	0.38	0.28	0.10

La Figura 5 muestra una mancha típica de fluoresceína y leche digitalizada en falso color para el test 8, (16/12/93).

La Figura 6 muestra dos series temporales correspondientes a la advección y dispersión de una mancha de 6 l de leche con fluoresceína, con un intervalo entre imágenes de 2 segundos para el test 9 y 5 s para el test 8 (la numeración de los tests es la de la tabla 5). Los contornos han sido dibujados para una intensidad entre 75-80 en una escala de grises entre 0 y 256.

La Figura 7 presenta la correspondiente serie modelada utilizando una malla regular de 2,5 m en un dominio de 362,5 m en x y 130 m en y, localizada en el perfil de playa P11 del Trabucador. El modelo de propagación y circulación usa condiciones de oleaje medidas y se calibró con las mediciones de corrientes realizadas con los emc. El modelo de dispersión comienza con condiciones iniciales similares a las medidas en los experimentos en las imágenes correspondientes al instante de vertido. Los coeficientes de dispersión en la ZR variaron entre 0,02-0,04 m²/s de acuerdo a la ec. 7. Estos valores son similares a los de la viscosidad turbulenta en el modelo hidrodinámico y a los utilizados por otros autores en la ZR (e.g. Deguchi et al., 1992).

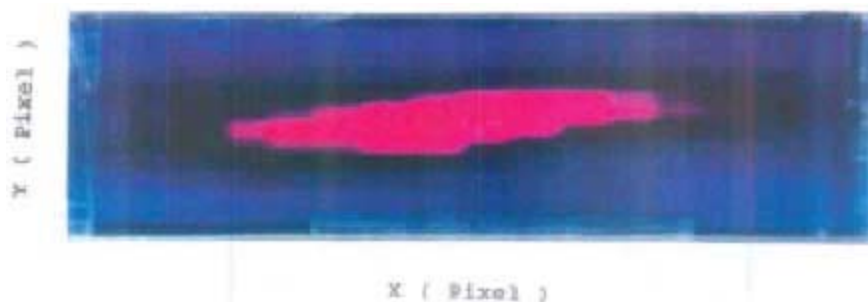


Figura 5: Imagen filtrada de una mancha de fluoresceína y leche para el test 8.

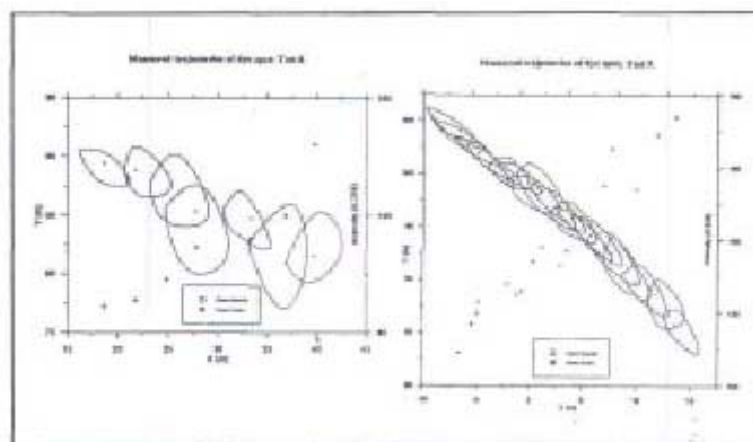


Figura 6. Trayectorias medias durante 30 s correspondientes a los tests 8 y 9. Notar la dispersión relativa y decaimiento en la intensidad de los centros.

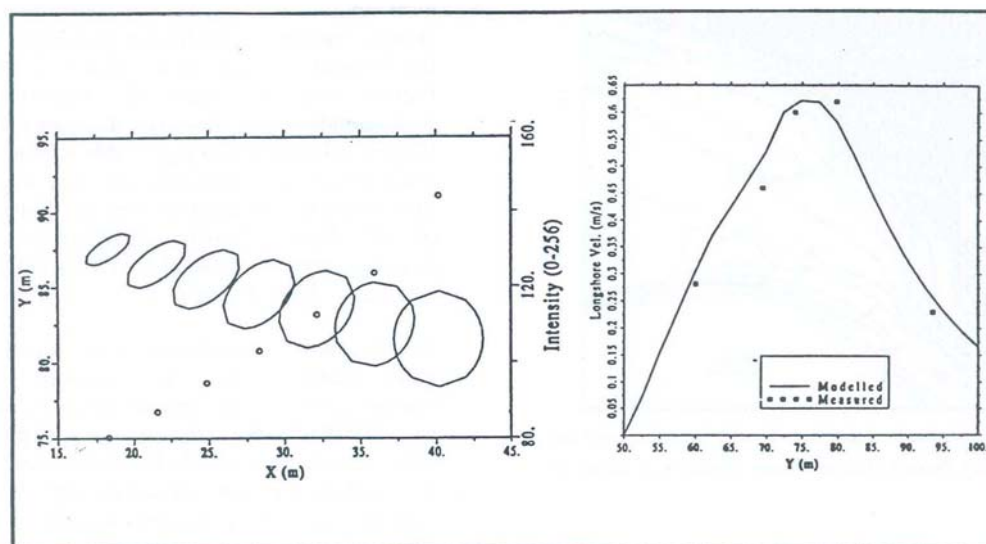


Figura 7. (Der) Perfil de veloc. long, medido y simulado en P11. y (Izq). Dispersión cale, para el test 8: líneas cont intensidad media entre 75-80 puntos intensidad de los centros de las manchas.

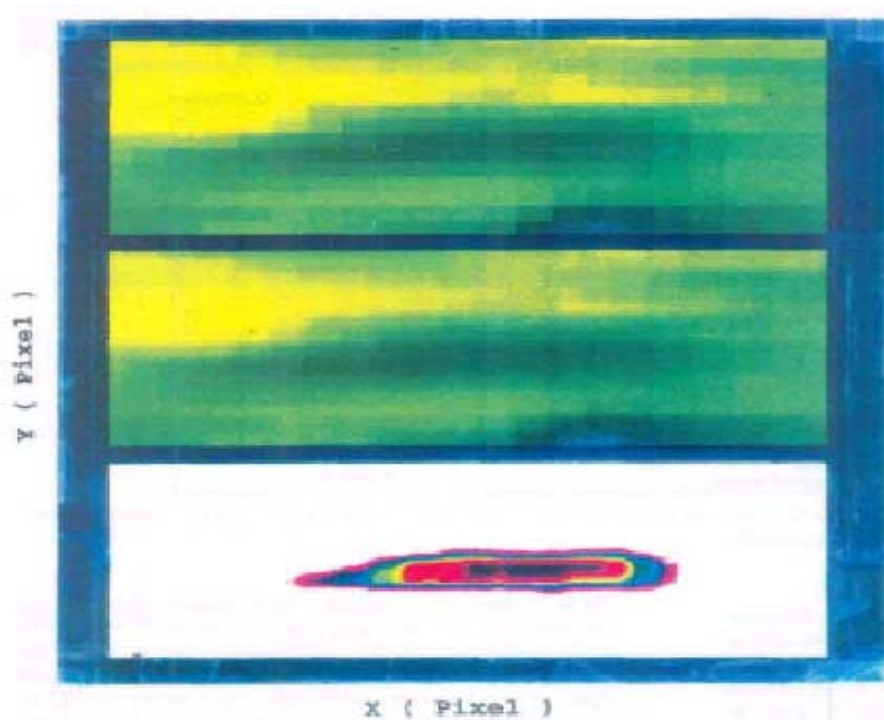


Figura 8. (Sup) Ventana ebn la imagen original de una mancan (Test 9)a 25 s del vertido, (Centro) Vent. filtrada (7*7) y (Inf.), Imagen final que revela la estructura interna de densidades.

Para ilustrar la capacidad del sistema de análisis digital de imágenes, se muestra en la Figura 8 un

ejemplo del proceso de mejorado en la resolución de una imagen de una mancha (test 9). En primer lugar, la imagen seleccionada es aumentada en una ventana (sup.) y filtrada para suavizar la estructura cuadriculada de pixels (centro). Después de invertir las intensidades y quitar el fondo ("background"), el rango de intensidades de la mancha es re-escalado para maximizar la resolución (0-256). El resultado final muestra claramente la estructura interna de intensidades de la mancha (inf.). Esta caracterización (cuantitativa) de la forma y estructura de la mancha permite estudiar propiedades de turbulencia en la ZR como escalas integrales de velocidad r.m.s., anisotropía, etc.

Caso de estudio 2: Zona litoral frente a Barcelona. Descargas por emisario submarino.

Los objetivos en éste caso son los de verificar la aplicabilidad del modelo desarrollado DISPER a un caso real, y estudiar el cumplimiento de las normas europeas de calidad de agua para

las playas cercanas al principal emisario submarino de Barcelona (Besós), cuya localización puede verse en la Figura 9.

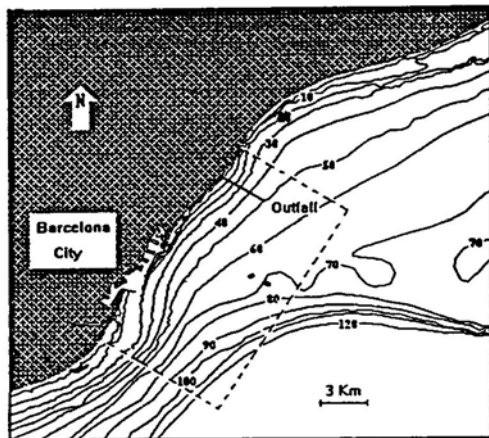


Figura 9. Área costera de Barcelona y localización del emisario. Las líneas discontinuas ilustran el área de estudio.

El modelo hidrodinámico ha sido utilizado para simular la circulación inducida por viento en condiciones típicas de invierno (ausencia de estratificación térmica y vientos de 5-10 m/s del NE). Se utilizó una malla regular ($\Delta x=300$ m, $\Delta y=450$ m) en un dominio con dimensiones de 16,5 Km y 22 Km perpendicular y paralelo a la línea de costa, respectivamente.

Para estudiar la tridimensionalidad de la mezcla en el

campo cercano se simuló descargas con diferente flotabilidad. Los dos casos límite se muestran en la Figura 10a. El caso de flotabilidad máxima corresponde a una descarga de agua dulce a $17,5^\circ$ C (Figura 10-caso a con $\rho_{ww} = 999$ Kg/m³). En los casos intermedios se consideraron descargas mezcladas parcialmente con agua de mar de densidad alrededor de 1014 Kg/m³. El otro caso límite corresponde a una descarga con flotabilidad casi nula (Figura 10-caso b con $\rho_{ww} = 1026$ Kg/m³).

La diferencia de densidad en el caso de descarga de agua dulce (caso a) ocasiona una intensa estratificación, como puede verse en la Figura 10a. Esta estratificación reduce la mezcla, permitiendo que altas concentraciones de bacterias alcancen las costa. En cambio, para una descarga con flotabilidad muy pequeña (caso b), a una distancia de 5 veces el calado (250 m aguas abajo) termina el campo cercano, permitiendo una mezcla en toda la columna de agua y concentraciones mucho menores. El modelo de campo cercano calcula, para el caso de la descarga neutra, un coeficiente de difusión turbulenta de $K_h = 0,018$ m²/s. Este valor es similar a los ajustados en el caso de estudio 1. al simular la dispersión de las manchas medidas con un rango de K_h entre 0,02 m²/s, 0,04 m²/s.

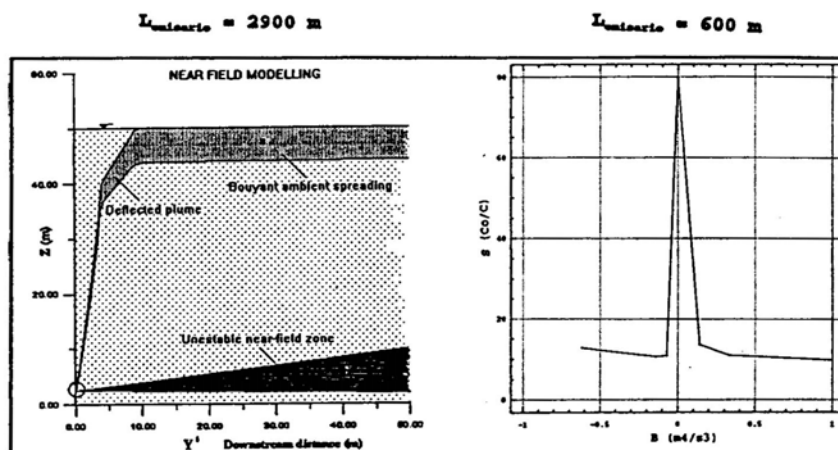


Figura 10 a-b. Mod. C. Cercano : a(lzq) Estr, D mezcla (c. extr. flotab.): (a) y(b) desc. a. dulce y neutra , b(der) Ef flot. de la des. e n la diluc. media S a 2000m ag. abajo.

Las simulaciones incluyeron diferentes condiciones geométricas e hidrodinámicas de la descarga. Respecto al emisario, se simuló los casos: de 600 m, y de 2900 m de longitud. La dispersión 3D en el campo cercano se simuló con el modelo CORMIX, dada su fiabilidad y aceptación en la comunidad internacional (Jirka, 1991). Los datos de la descarga fueron: 11 m y 50 m de profundidad para los dos emisarios considerados; un caudal de vertido de 12,0 m³/s y $C_0=10^6$ bact/ cm³. El campo de velocidades simulado se muestra en la Figura 11. El agua marina se consideró con una salinidad de 3,5% y una temperatura de $11,5^\circ$ C, lo que implica $\rho_{mar} = 1027$ Kg/m³.

En la Figura 10b se muestra la influencia del flujo de flotabilidad de la descarga (definido como $B^*(g/\rho)\rho'w$) en la dilución $S = C/C_0$. El ejemplo corresponde a un punto 2000 m aguas abajo de la fuente puntual (sin difusores) para el caso del emisario antiguo de 600 m de longitud. Se puede observar el aumento de dilución a medida que las descargas se vuelven neutras (flotabilidad nula). Para plumas con flotabilidad negativa, vuelve a haber una reducción en la dilución (éste es el caso de descargas en agua dulce más templada y corrientes de densidad o turbidez).

La simulación de la dispersión en el campo lejano incluyó numerosas situaciones típicas con tasas de decaimiento bacteriano típicas de la costa

Mediterránea, con T_{90} 0,5-1,5 hs (e.g. Bravo, 1985 y Mujeriego, 1989). Los coeficientes de dispersión en general se estimaron mediante la ecuación 6 con valores estándar de $\beta_p = 5,9$ y $\beta_c = 0,23$.

Las predicciones fueron similares a las obtenidas en estudios previos -Mead y Cooper, (1992)- con un modelo 3D, cuando no había estratificación y las tasas de decaimiento eran similares (Mead y Cooper consideraron un T_{90} entre 1,5-24 hs). A modo de ejemplo, en la Figura 11 se muestra la pluma en el campo lejano, para el caso del emisario de 2900 m, con $Q_{\text{puntual}} = 12,0 \text{ m}^3/\text{s}$, $P_{\text{ww}} = 1026 \text{ Kg/m}^3$ y $T_{90}=24\text{hs}$.

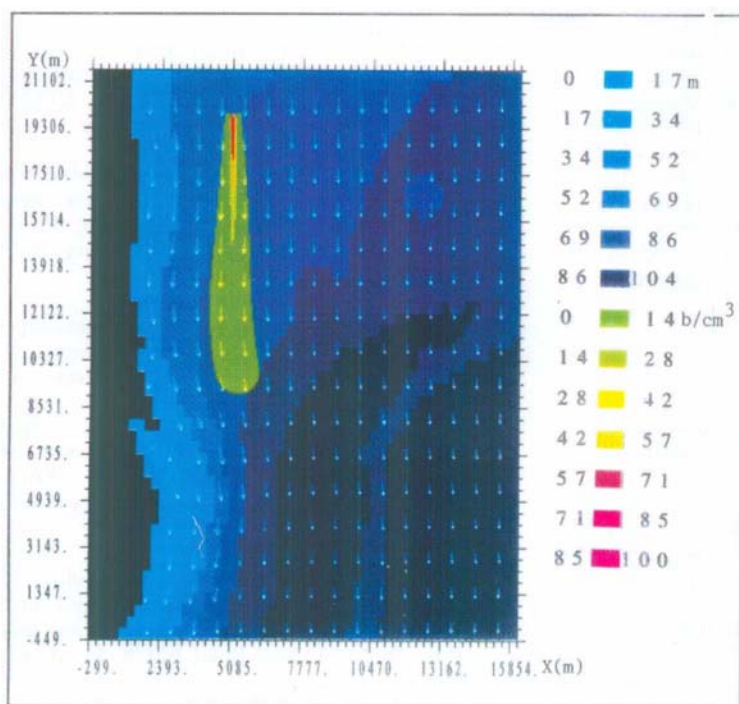


Figura 11. Ejemplo de Simulación "HD en el campo lejano para $Q = 12 \text{ m}^3/\text{s}$; $Co = 10^6 \text{ b/cm}^3$ $\Delta t = 375 \text{ s}$; $T_{90} = 24 \text{ h}$ y $\beta_p = \beta_c = 0.23$

RESUMEN Y CONCLUSIONES

El promediado temporal de imágenes espaciales y las series temporales de intensidad en transectos (líneas verticales u horizontales de una imagen) han demostrado ser una técnica conveniente para la caracterización de la dispersión en trazadores (simulando contaminantes) en presencia de olas y corrientes, aún en medios de tan compleja medición como la zona de rompientes (ZR). El trazador ideal debe ser escogido cuidadosamente de acuerdo a las condiciones climáticas, para optimizar su contraste con el agua.

Los efectos de la corriente longitudinal, en la dispersión de las manchas, fueron una característica dominante durante los experimentos. Las mediciones

Lagrangianas (video) y Eulerianas (emc) de corrientes longitudinales fueron similares en todos los casos, lo que en alguna medida demuestra la intensa mezcla vertical en la ZR. Por el contrario para la componente transversal a la costa, en varias ocasiones las mediciones mediante el video mostraron una velocidad hacia el mar mayor a la medida por los emc bajo el nivel de senos de la olas ("undertow"). Esta observación es contradictoria con lo esperable (y lo medido por los emc), teniendo en cuenta la estructura vertical del flujo medio transversal: hacia costa en superficie y hacia el mar bajo el nivel de senos. Una posible explicación es que las filmaciones reflejen la influencia de oscilaciones de baja frecuencia en el "undertow" debido a su menor duración (aproximadamente 5 olas) frente a las series de los emc (40 veces más largas).

De acuerdo con los resultados numéricos del caso de estudio 1 en la ZR, los coeficientes de dispersión horizontal transversal parecen tener propiedades similares a los coeficientes de viscosidad turbulenta utilizados en el modelado hidrodinámico, mientras que el coeficiente longitudinal experimental parece ser menor que el calculado con la ecuación 6.

Para el caso de estudio 2, las comparaciones entre las opciones de descarga simple o con difusores (módulos CORMIX1 o CORMIX2), han puesto de manifiesto la importancia y utilidad de los difusores, especialmente cuando los efectos de flotabilidad son poco intensos.

Los efectos de la flotabilidad de la descarga son muy fuertes, especialmente en la dilución alcanzada en el campo cercano. Por ejemplo para 100 m aguas abajo de la descarga, la dilución disminuye 7 veces si no hay flotabilidad. Estos efectos tienen, obviamente, una fuerte influencia sobre la dispersión de bacterias u otros contaminantes en las aguas costeras.

Los resultados de las simulaciones para el caso de estudio 2, son similares a las obtenidas en estudios previos con un modelo 3D cuando se consideran condiciones no estratificadas (invierno). Solo la opción del emisario "largo" (2900 m), permite alcanzar niveles de concentración compatibles con los exigidos por la normativa comunitaria para el baño. Sin embargo, tanto los presentes resultados como los obtenidos por Mead y Cooper (1992), deberían ser calibrados usando medidas representativas de la

hidrodinámica y del T_{90} , para aumentar la fiabilidad de las predicciones.

La metodología y modelos desarrollados proporcionan resultados útiles para evaluar los niveles de contaminación a lo largo de la costa para diversas situaciones (longitud y posición del emisario, intensidad y dirección del viento, flotabilidad del efluente, etc). Por lo tanto, el diseño y operación del emisario pueden ser optimizados para minimizar el impacto ambiental por contaminación bacteriana.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue realizado como parte de los proyectos de investigación del LIM-UPC en Contaminación costera e Hidrodinámica de la Zona de Rompientes, financiados por el Direcc. Gral. de Medi Ambient de la Generalitat de Catalunya el primero, y conjuntamente por la Dirección Técnica Programa de Clima Marítimo (Ente Público Puertos del Estado - MOPTMA) y el Ministerio de E. y C. (DGICYT) el segundo. Los autores agradecen la colaboración de J.P. Sierra, J.Sospedra, J.Gomez y al personal involucrado en las mediciones de campo. También se agradece al Dr. G. Jirka sus comentarios sobre la dispersión en campo cercano y la disponibilidad del modelo CORMIX, y a EMSSA por la atención en suministrar datos de la planta y emisarios del Besos.

REFERENCIAS

- Battjes, J. (1975). Modeling of turbulence in the surf zone, Proc. Sympo. on Modeling Techniques, ASCE, 1050-1061.
- Bravo, J. (1985). Analisis y Evaluación de la Calidad Microbiológica de las Aguas Costeras, Tesis Doctoral, Univ. Aut. de Barcelona, 257 pg.
- Carreras P. y Menendez A. (1990). Mathematical modelling of pollutant dispersion, Ecological modelling, Elsevier, 52, 29-40.
- Crickmore M.J. (1972). Tracer tests of eddy diffusion in field and model, Jour. Hyd. Div., ASCE, Vol. 98, no. HY10, 1737-1752.
- Deguchi I., Sawaragi T. y Ono M. (1992). Longshore current and lateral mixing in the surf zone. Proc. Int.Conf.Coast.Eng., ASCE, 2642-2654.
- Dean R. y Dalrymple, R. (1984). Water wave mechanics. Prentice-Hall, N. Jersey.
- Fredsoe J. (1984). The turbulent boundary layer in wave-current motion, Jour. Hyd. Eng., ASCE, Vol. 110, no. 8, 1103-1120.
- Harris T., Jordan J. McMurray W., Verwey C. y Anderson F. (1963). Mixing in the surf zone, Int.Jour.Air Wat.Poll., Vol. 7, 649-667.
- Holly F.M. y Usseglio-Polatera J.M. (1984). Dispersion Simulation in Two-Dimensional Tidal Flow, Jour.Hyd.Eng., ASCE, Vol. 110, no. 7(Julio), 905-926.
- Horikawa K., Lin M. y Sasaki T. (1978). Mixing of heated water discharged in the surf zone, Proc. Int.Conf.Coast.Eng., ASCE, 2563-2583.
- Jirka, G. (1991). CORMIX: Cornell Mixing Zone Expert System, I.C.E. Short Course on Hydraulics of Sea Outfalls, University of Honk Kong, Diciembre 1991.
- Mancini, J. (1978). Numerical estimates of coliform mortality rates under various conditions, Journal of water pollution control fed., Noviembre, 2477-2484.
- Mead C., y Cooper A. (1992). Three-dimensional numerical modelling of coastal hydrodynamics and pollutant dispersal, Proc. 2nd. Int. Conf. Hyd. and Env. Mod. of Coast., Est. and River Waters, Vol. 1, Ashgate Pub., 31-41.
- Mujeriego, R. (1989). Estudio del saneamiento de las zonas costeras de Cambrils y Vilaseca-Salou, Inf.Sec.Ing.Eng.Amb.}, DEHMA, ETSECCPB, UPC, Barcelona, Septiembre, 152 pg.
- Nadaoka K. y Hirose F. (1986). Modelling of diffusion coefficient in the surf zone based on physical process of wave breaking, Proc. 33rd Japan Conference Coastal Engineering, 26-30, (en japonés).
- Ozmidov, R. (1990). Diffusion of contaminants in the ocean, Oceanographie Sciences Library, Vol. 4, Kluwer Academic Publishers, Londres.
- Redondo J., Rodriguez A., Bahia E., Falqués A., Gracia V., Sánchez-Arcilla A. y Stive M.J.F. (1994). Image Analysis of Surf-Zone Hydrodynamics, Proc. Coastal Dynamics 94, ASCE, pp 350-365.
- Rodriguez A., Sánchez-Arcilla A., Collado F., Gracia V. y Coussirat M.G. (1994). Waves and currents at the Ebro Delta Surf Zone: measured and modelled Proc. Int.Conf.Coast.Eng., ASCE, (en prensa).
- Sánchez-Arcilla A.; Collado F., Lemos C. y Rivero F. (1990). Another quasi-3D model for surf-zone flows, ICCE, ASCE, pp 316-329.
- Sánchez-Arcilla A., Collado F., y Rodriguez A. (1992). Vertically varying velocity field in Q3D nearshore circulation, Proc. Int.Conf.Coast.Eng., ASCE, 2811-2838.
- Sierra J.P., Rodriguez A., Bahia E. y Sánchez-Arcilla A. (1994). Dispersió de contaminants en regions costaneres. Informe de recerca RR-LIM/ADC-94-1, Barcelona.
- Svendsen, I. (1987). Analysis of surf zone turbulence, Jour. Geophysical Research, 92 (C5), 5115-5124.
- Zeider R. (1976). Coastal Dispersion of Pollutants, Jour. Waterw. Harb. Coast. Eng., ASCE, Vol. 102, no. WW2 (May), 235-254.