



## PREDICCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LAS MANCHAS DE HIDROCARBURO DERRAMADO EN EL MAR

Serguei LONIN<sup>1</sup>, Carlos PARRA LLANOS<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Investigación en Oceanología, Escuela Naval de Cadetes “Almirante Padilla”, Cartagena de Indias, E-mail: [slonin@costa.net.co](mailto:slonin@costa.net.co).

<sup>2</sup> Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas – CIOH, Isla Manzanillo, Cartagena de Indias, AA. 982, D. T. y C., Colombia, E-mail: [cedat@cioh.org.co](mailto:cedat@cioh.org.co).

**Resumen** - Se describe el “estado del arte” de la modelación de desplazamiento y evolución de manchas de hidrocarburos, implementado en el CIOH como un sistema operativo para facilitar el proceso de mitigación de la contaminación en el caso de derrames para las áreas de la industria petrolera y en el Mar Caribe en general. Se presenta el software amigable para el uso operativo del modelo de la Bahía de Cartagena y del sistema SPOD para el Mar Caribe. Se discuten los problemas de utilización de esta tecnología.

**Abstract** - State-of-the-art of oil spill fate and motion modeling, implemented in the CIOH as an operative system to make easier the mitigation of oil contamination in the petroleum industry zones and the Caribbean in general, is described. Friendly software for the operative usage of the system in the Cartagena Bay and the SPOD in the Caribbean is shown. The problems of utilization of this technology are discussed.

**Palabras clave** – Modelo derrames hidrocarburos, Mar Caribe.

**Key words** - Oil spill model, Caribbean Sea.

### INTRODUCCIÓN

Los derrames de hidrocarburos como resultado de accidentes de los tanqueros en el mar son frecuentes alrededor de todo el mundo. Los derrames más significativos en las últimas décadas fueron de *Atlantic Empress* (1979) con 287,000 toneladas del hidrocarburo derramado, *ABT Summer* (1991) con las 260,000 toneladas, *Castillo de Bellver* (1983) con las 252,000 toneladas y *Amoco Cadiz* (1978) con las 223,000 toneladas. Según la estadística de derrames, encontrada en <http://www.itopf.com/stats.html>, la

frecuencia de los accidentes en el mar de más de 700 toneladas disminuye significativamente. Así, por ejemplo, para los años 1970-79 ocurrieron en promedio 25.2 derrames por año, mientras que entre los años 1980 y 1989 solamente 9.3 por año y para el periodo entre 2000 y 2004 solamente 3.8 derrames por año. Es preciso resaltar que una de las mayores causas de ocurrencia de los derrames es el proceso de cargue y descargue, 37% (no así las colisiones que se representan el 2%), lo que para nosotros reviste gran interés dado que es éste el proceso cotidiano en las costas colombianas.

Los derrames menos significativos (por el volumen, pero no por el daño potencialmente causado) ocurren en el mundo diariamente. Las causas más usuales son colisiones de los buques, derrames en el proceso de carga-descarga y encallamiento de los tanqueros en los bajos. Los ejemplos en el Caribe colombiano más recientes son el derrame en Santa Marta (tanquero "ALMA ATA", el 5 de agosto de 2003) por el efecto de una colisión con un remolcador y el derrame del tanquero "SAETTA" de bandera de Malta, encallado en la salida del canal de navegación de la Bahía de Cartagena el 20 de abril de 2005.

Los hidrocarburos afectan el medio ambiente dramáticamente. La parte volátil, usualmente más tóxica, y una fracción de ella, la que no alcanza evaporar, fácilmente se diluye en el agua produciendo un daño inmediato en la zona de alcance por difusión y corrientes marinas. Las fracciones pesadas no se evaporan y son poco solubles, son capaces de formar una emulsión de dos tipos: "aceite en agua" y "agua en aceite". La primera es conocida como gotas de hidrocarburo que penetran en la columna de agua y se transportan por las corrientes en distintas direcciones de la mancha superficial, su surgencia en algún momento puede causar la aparición de una película de aceite en la superficie que puede alcanzar zonas relativamente lejanas a la fuente. El segundo tipo de emulsión se conoce como "mus de chocolate", tiene una viscosidad alta y se envejece por las reacciones de fotólisis y biológicas, produciendo con el tiempo los agregados que se depositan en el fondo marino resultando una contaminación secundaria.

Un evento drástico durante un derrame es el momento en que la mancha llega a la costa. Dependiendo del nivel de vulnerabilidad de una costa, el daño puede ser más o menos fuerte y varía también con la amplitud de la marea, tipo de sedimentos y su porosidad; la limpieza de las costas es la única medida de recuperación. Por lo tanto, una de las variables más importantes para predecir el comportamiento de una mancha es su trayectoria y el momento de contacto con la zona costera. Los modelos numéricos de derrames cumplen con este objetivo. Adicionalmente, los modelos pueden predecir el proceso de envejecimiento de la mancha, cambio de sus características físico-químicas,

dar un balance de masa evaporada, diluida, encontrada en la película superficial o en la emulsión y la cantidad que potencialmente puede llegar a la costa. La decisión del uso de dispersantes puede ser basada en las salidas del modelo.

El diseño e implementación de los modelos de derrame en el CIOH empezó a partir del año 1995, con base en el modelo CODEGO (Lonin y Giraldo, 1995) para el caso de la Bahía de Cartagena. Otras dos áreas costeras fueron abarcadas (Lonin, 1997), el Golfo de Morrosquillo y Pozos Colorados de Santa Marta. Se consideró, que éstas son las zonas de mayor riesgo de derrames por la presencia directa de la actividad de la industria petrolera. El concepto del modelo de derrames fue basado en los trabajos de Lonin & Tuchkovenko (1995a, 1995b), enriquecido con nuevos mecanismos, diseñados para la dinámica tri-dimensional en Lonin (1999). Luego, en Lonin (2001) fue realizado un modelo inverso para identificar las fuentes posibles de derrames cuando una mancha se observa en el mar, pero no se sabe con exactitud el culpable del derrame. Finalmente, en Lonin *et al* (2003a) se presentó un modelo que predice las trayectorias de las manchas a gran escala, cubriendo todo el Mar Caribe, sacrificando por tanto algunos procesos finos en la mancha y la resolución espacial.

El presente trabajo presenta matemáticamente, por primera vez, todos los mecanismos del comportamiento de derrames, representando el estado del arte de la modelación de las manchas derramadas. Una excelente revisión del estado de arte en la modelación de dinámica de manchas de hidrocarburo se da en ASCE Task Committee on Modeling of Oil Spills of the Wat. Res. Eng. Div. (1996).

Un modelo de derrame no tendrá ninguna aplicabilidad si no se conoce el campo de corrientes. Un modelo hidrodinámico tiene que ser entonces parte del modelo integral de derrames. Sin embargo, no es el objetivo del presente trabajo demostrar el bloque hidrodinámico, se asume que los campos de corrientes y de turbulencia se conocen. En el próximo apartado se encuentra una breve descripción de áreas, donde los modelos de derrames fueron implementados en el CIOH. Luego, en la Metodología se da una descripción detallada del bloque de derrame.

El producto operativo se encuentra actualmente en uso a través del software amigable que día a día emplea un operador de guardia. En el apartado Interface Amigable se presenta esta parte del sistema. Discusión presenta el estado actual y el futuro del tema de la modelación de derrames de hidrocarburos en el mar.

### ÁREAS DE INTERÉS

En el desarrollo de los modelos numéricos se han abordado las áreas que revisten interés y dado su cubrimiento, se agruparon en dos: I) Zonas costeras, tales como Pozos Colorados de Santa Marta, Bahía de Cartagena y Golfo de Morrosquillo y II) Zonas oceánicas, el Mar Caribe en general. El primer grupo fue contemplado en el proyecto de los años 1995-1998 (DIMAR-COLCIENCIAS), con una actualización para la Bahía de Cartagena en el proyecto ASHIDRO, año 2004 (DIMAR); el caso II fue implementado en el sistema SPOD, años 2001-2003, (DIMAR).

### METODOLOGÍA

El crudo es una mezcla de sustancias que difieren en sus propiedades físico-químicas. Además, dependiendo de su origen, el compuesto puede variar (Stoker and Seager, 1977), haciendo difícil la descripción matemática de la dinámica del crudo en el mar. Esto nos está obligando a tomar varias suposiciones, dependiendo de las escalas de los procesos, condiciones de derrame y los objetivos para lograr.

Sin embargo, en contraste con los primeros trabajos de Lonin y Tuchkovenko (1995a, 1995b), en el desarrollo posterior fue posible superar ciertas limitaciones: el derrame puede ser un evento continuo (no instantáneo), la dinámica propia del hidrocarburo se acopla desde el momento del derrame con el movimiento producido en el medio ambiente, la dispersión del producto ocurre en tres dimensiones. Juegan un rol predominante en la transformación de la mancha la evaporación, emulsificación, penetración de gotas de aceite en el agua, advección y difusión del hidrocarburo en el espacio y la interacción con la costa. Debido al propósito operativo del modelo, cuando

los tiempos de predicción se limitan por el tiempo característico de llegada de una mancha a la orilla costera, los procesos relativamente más lentos, como desintegración foto-bioquímica y degradación biológica no se incluyen.

Desde la ley de Fay se sabe que en ausencia de la difusión turbulenta y deformaciones externas, la mancha en el momento inicial tendrá que pasar las tres fases dinámicas (Zhurbas, 1978): inercial, gravitacional-viscosa y tensión superficial.

La primera fase dura un tiempo  $0 \leq t \leq T_1$ , cuando las fuerzas de gravedad e inercia son determinantes. Esto ocurre hasta cuando el espesor de la película superficial  $\eta$  con un radio  $R = K_m (\Delta\rho \rho_w^{-1} g \mathfrak{V})^{1/4} t^{1/2}$  alcance el valor  $\delta = (\nu t)^{1/2}$ , el espesor de la subcapa viscosa. Aquí:  $K_m = 1.14$ ;  $\nu$  es la viscosidad molecular de agua;  $g$  es la gravedad;  $\Delta\rho = \rho_w - \rho_0$ ;  $\rho_w$ ,  $\rho_0$  son densidades medias de agua y del crudo, respectivamente;  $\mathfrak{V}$  es el volumen derramado (instantáneamente!).

Después, entre los tiempos  $T_1 \leq t \leq T_2$ , las fuerzas de gravedad y de viscosidad tendrán influencia incrementando el radio característico de la mancha como  $R = K_b (\Delta\rho \rho_w^{-1} g \mathfrak{V}^2 \nu^{-1/2})^{1/6} t^{1/4}$  hasta que  $\eta \leq [\sigma (\Delta\rho / \rho_w)^{-1} g^{-1} \rho_w^{-1}]^{1/2}$ ;  $\sigma$  es la tensión superficial en la superficie de agua (Kraus, 1972).

Luego, en la fase de la tensión superficial ( $T_2 \leq t \leq T_{max}$ ) el radio de la mancha dependerá del tiempo  $R = K_t (\sigma^2 t^3 / \rho_w^2 \nu)^{1/4}$  hasta que el espesor  $\eta$  alcance un valor mínimo  $\eta_0$  para esta fase ( $\eta_0 \approx 0.5$  mm), pero la película puede expandirse hasta tener un espesor monomolecular (Nelson-Smith, 1972).

El concepto dado de la ley de Fay puede ser resumido con la siguiente aproximación:

$$dA/dt = K_1 A^{1/3} [\mathfrak{V}/A]^{4/3}, \quad (1)$$

donde  $A$  es el área de la mancha en el tiempo y  $K_1$  es una constante aproximadamente igual a  $150 \text{ s}^{-1}$  (Mackay et al., 1980).

En términos generales,  $K_1$  es la única constante en (1) que puede depender del tipo de crudo. Además, la fórmula (1)

simula un área circular, lo que usualmente no sucede en la naturaleza; es decir, los demás procesos no participan en el momento de simulación de las fases propias de deformación de la mancha de crudo, lo que representa cierta incertidumbre en el uso de la fórmula (1). En Lonin et al (2003b) fue determinada la forma más apropiada, cuando las fases iniciales de Fay pueden acoplarse desde el momento  $t=0$  con la dinámica de la mancha por los efectos ambientales y, por lo tanto, la mancha podría tener deformaciones y no presentarse en forma circular, gobernada por la ley de Fay. Con este fin, se aplica el método lagrangiano de trazadores. El método eulereano es menos conveniente, debido a que la ecuación de transporte de hidrocarburo con los efectos de difusión es una ecuación parabólica, cuya propiedad matemática es la velocidad infinita de difusión de la materia (Lonin, 1999).

Aplicando los trazadores lagrangianos, el volumen total de hidrocarburo derramado en la superficie del mar, se caracteriza mediante una cantidad  $N$  de partículas infinitesimales bajo la influencia regular del medio marino con componentes horizontales determinísticas de velocidad  $\langle u(x,y,z,t) \rangle$ ,  $\langle v(x,y,z,t) \rangle$  y sus fluctuaciones turbulentas,  $u'(x,y,z,t)$ ,  $v'(x,y,z,t)$ . Aquí,  $u$  y  $v$  son las componentes de velocidad de corrientes en las direcciones del plano  $x$  e  $y$ , respectivamente.

Las coordenadas de los trazadores superficiales (mancha superficial) se definen en cada paso de tiempo como:

$$\frac{dX_k}{dt} = \langle u \rangle + u'_k, \quad \frac{dY_k}{dt} = \langle v \rangle + v'_k \quad (2)$$

donde  $\langle u \rangle$  y  $\langle v \rangle$  se buscan en el modelo hidrodinámico mediante interpolación de las velocidades  $U$  y  $V$  en los nodos de la respectiva malla.

Las fluctuaciones  $u'_k$  y  $v'_k$  se pueden calcular aplicando la técnica de "random walk", así que

$$u'_k = V' \xi \sin(2\pi\xi), \quad v'_k = V' \xi \cos(2\pi\xi), \quad (3)$$

donde  $\xi$  es el "ruido blanco" estándar gaussiano (desviación unitaria y promedio nulo);  $V'$  es el valor r.m.s. de las fluctuaciones estocásticas turbulentas de la velocidad horizontal.

El último valor depende de la escala de tiempo ( $\Delta t$ ) y está relacionado con la difusión horizontal  $K_h$  a través de la siguiente relación:

$$V' = \sqrt{c' K_h / \Delta t}, \quad (4)$$

donde  $c'$  es una constante. Los experimentos numéricos efectuados en Lonin (1999) mostraron que el valor de esta constante es muy cercano a 2. El valor de  $K_h$  se determina en el bloque de turbulencia del modelo hidrodinámico.

El concepto de simulación de las fases iniciales se modifica, acoplándolas simultáneamente con los demás fenómenos dinámicos que afectan la mancha. En términos lagrangianos, el área de la mancha se representa como  $A(t) = (\sigma_h)^2$ , donde el último valor es la dispersión horizontal de la mancha. Rescribiendo la fórmula (1) en términos de la dispersión espacial tenemos:

$$d(\sigma_h)^2 / dt = K_1 (\sigma_h)^{-2} \mathfrak{T}^{4/3}. \quad (5)$$

Aplicando ahora la fórmula (Monin & Yaglom, 1971) que relaciona la dispersión espacial  $(\sigma_h)^2$  y la dispersión de velocidades  $\langle V' \rangle^2$  (los paréntesis indican un promedio de ensamble temporal a través de la escala macro de Taylor,  $T_L$ ), se tiene:

$$(\sigma_h)^2 = 2 \langle V' \rangle^2 T_L t, \quad (6)$$

así que de la integración de (1) resulta que

$$V' = (K_1)^{1/4} \mathfrak{T}^{1/3} t^{-1/4} / (2T_L)^{1/2}. \quad (7)$$

La fórmula (7) fue probada comparando las áreas encontradas según (1) y aplicando (7) junto con las ecuaciones (2) y (3) sin tener en cuenta el proceso (4).

En la simulación del comportamiento de hidrocarburos, los mecanismos (4) y (7) se acoplan, por lo tanto finalmente tenemos:

$$V' = (K_1)^{1/4} \mathfrak{T}^{1/3} t^{-1/4} / (2T_L)^{1/2} + \sqrt{c' K_h / \Delta t} \quad (8)$$

El análisis de la fórmula (8) muestra que inicialmente, en los primeros momentos posteriores al derrame, el primer término en la parte derecha de la ecuación es el más destacado, mientras que con el tiempo la

influencia de este término disminuye y se establece un predominio del segundo.

Los demás procesos en la mancha fueron descritos en Lonin y Tuchkovenko (1995b) así: En el dominio  $\Omega$  con un contorno  $\partial\Omega$  suficientemente suave, la ecuación de la dinámica de la mancha superficial se define por

$$B\eta + L_1\eta = -E - f_{12} - f_{b1} - f_{ph}, \quad (9)$$

donde  $B = \partial/\partial t$ ;  $L_1 = \text{div}(\bar{U} \cdot) - D_0 \Delta$ ;  $\Delta$  es el Laplaciano;  $D_0$  es el coeficiente eficiente de la difusión horizontal de la mancha;  $E$ ,  $f_{12}$ ,  $f_{b1}$ ,  $f_{ph}$  son pérdidas de la mancha, relacionadas con los procesos de evaporación, emulsificación, desintegración biológica y fotoquímica, respectivamente (los últimos dos no son de interés para nuestro estudio debido a que su escala de tiempo es mucho mayor que los tiempos operativos de prevención de desastres);  $\bar{U}$  es el vector de la deriva eficiente, relacionada con el vector de viento  $\bar{W}$  y el de la corriente superficial  $\bar{V}(z=0)$  como

$$\bar{U} = K_w \bar{W} + K_s \bar{V}(z=0), \quad (10)$$

donde el coeficiente de deriva según Zhurbas (1978) es  $K_w = 0.03$  y el coeficiente  $K_s = 0.56$ . La aplicabilidad de esta fórmula se analiza en la Discusión.

La intensidad de evaporación de acuerdo con Cormack (1983) se define como:

$$E(t) = \sum_{k=1}^n E_k(t) = \sum_{k=1}^n K_a P_{0k} m_k M_0 / (R_g T m_0) \quad (11)$$

donde  $E_k(t)$  es el flujo de la fracción  $k$  del crudo;  $P_{0k}$  es la presión parcial de vapor para una temperatura  $T$  dada;  $M_0$  es la masa molar de crudo;  $R_g$  es la constante universal de gases;  $m_k$  y  $m_0$  son masas de fracción  $k$  y del crudo entero;  $K_a$  es el coeficiente de transferencia de masa hacia la atmósfera, que depende de la velocidad de viento como  $K_a = 1.25 \cdot 10^{-3} |\bar{W}|$ .

Los experimentos de laboratorio, realizados recientemente por Fingas (Fingas, 1996), demostraron que la tasa de evaporación de hidrocarburo depende muy poco de la intensidad de los vientos, cantidad derramada y el área afectada, así

que resulta mejor establecer las relaciones empíricas para cada tipo de hidrocarburo en particular, resumiendo las fórmulas para las dos clases de hidrocarburos: livianos y pesados. La tasa de evaporación de la primera clase se describe como:

$$E(t) = [A_1 + A_2 T] \ln(t), \quad (12a)$$

mientras que para los pesados es:

$$E(t) = [A_1 + A_2 T] t^{1/2}, \quad (12b)$$

donde los coeficientes  $A_1$  y  $A_2$  son empíricos, dependen de la temperatura  $T$  y se encuentran en el catálogo de *Environment Canada* para la mayoría de tipos de crudos. Para los crudos colombianos estos datos se presentan en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Las constantes de Fingas (comunicación privada) para los principales crudos de Colombia. Se aplica la fórmula (12a).

Nombre del crudo	$A_1$	$A_2$
Caño Limón	1.71	0.045
Cusiana	3.39	0.045
Vasconia	0.84	0.045

Antes de escribir la expresión para  $f_{12}$ , definimos en forma análoga a (9) la ecuación de la dinámica de emulsión de tipo "aceite en agua" con una concentración volumétrica  $C$ :

$$BC + L_2 C = -K_d, \quad (13)$$

donde  $L_2 = \text{div}(\bar{V} \cdot) + (w + w_0) \partial/\partial z - \alpha_c A_L \Delta - \partial/\partial z[(\alpha_c K_z + \nu) \partial/\partial z]$ ;  $A_L$  y  $K_z$  son coeficientes de turbulencia en horizontal y vertical respectivamente;  $\bar{V} = \bar{V}(x, y, z)$  es el vector de corrientes;  $\alpha_c$  es el número inverso turbulento de Schmidt para la sustancia;  $w$ ,  $w_0$  son velocidades verticales de agua y gotas de hidrocarburo ( $w_0 < 0$ ). La última se define posteriormente en la ecuación (21).

En el momento inicial  $t = 0$  debe ser

$$\eta = \eta_0; \quad C = 0. \quad (14)$$

Las condiciones de contorno para (9) y (13) en la costa  $\partial\Omega_c$  con una normal  $\bar{n}$  son

$$D_0 \partial\eta/\partial\bar{n} = -f_{1c}; \quad \alpha_c A_L \partial C/\partial\bar{n} = -f_{2c}, \quad (15)$$

donde  $f_{1C}$ ,  $f_{2C}$  son descargas de hidrocarburo, causadas por la penetración en los espacios interporosos de los sedimentos en la costa. Los valores  $f_{1C}$  y  $f_{2C}$  se toman iguales a  $\beta v' \eta$  y  $\beta v' C$  respectivamente, (donde  $v'$  es la tasa característica de penetración de crudo en el sedimento); el parámetro  $\beta$  varía en el rango desde 0 hasta 1 de acuerdo con la clasificación de vulnerabilidad en la escala de 10 (Gundlach et al., 1978). Según esta clasificación, nosotros simplemente asignamos, por ejemplo, para el acantilado rocoso  $\beta = 0.05$ , mientras que para la costa con manglar  $\beta = 0.95$ .

Debido a que la emulsión de “aceite en agua” usualmente se presenta en una capa de unos metros desde la superficie, la concentración  $C$  en el fondo  $z = H$  es mínima, así que la condición de contorno en esta frontera es:

$$-w_0 C + (\alpha_c K_z + v) \partial C / \partial z = 0. \quad (16)$$

En la superficie del mar ( $z = 0$ ) para la emulsión:

$$-w_0 C + (\alpha_c K_z + v) \partial C / \partial z = \begin{cases} f_{12}, & \text{at } \eta > 0 \\ 0, & \text{at } \eta = 0 \end{cases} \quad (17)$$

Debido a que es difícil distinguir la película superficial y la emulsión de tipo “agua en aceite”, como el resultado de los procesos de absorción [aunque las propiedades físicas de las emulsiones son muy distintas (Figuras 7-9) de la película], vamos a considerar la emulsión del tipo “aceite en agua” como la formación de gotas de hidrocarburo, resultado de rompimiento de olas. Para este caso, en el trabajo previo (Lonin y Tuchkovenko, 1995b) no se tuvo en cuenta a través de la condición (17) la posibilidad de que las gotas de hidrocarburo puedan regresar a la superficie, formando una película superficial de nuevo. Como una de las consecuencias, no se ha contemplado que las gotas emulsificadas contengan las fracciones volátiles, capaces de evaporarse o, en otras palabras, se presumió que éstas se diluyen por completo.

Se asumió que el flujo  $f_{12}$  se puede definir en forma análoga con el mecanismo de involucración (“*entrainment*”) de termoclina según Phillips (1977). También se asumió, que la rata  $d\eta/dt$  con que disminuye el espesor de la película superficial se define a través de las propiedades físicas del líquido por el flujo  $Q_t$  de la energía de turbulencia en las olas rompientes y por las fuerzas de boyancia, es decir,

$$d\eta/dt = u_* f(Ri) = u_* Ri^{-n}, \quad (18)$$

donde  $n > 0$ ;  $u_*$  es la velocidad de fricción en la superficie del mar y  $Ri$  es el número global de Richardson, así que

$$Ri = g \Delta \rho \eta / (\rho_0 u_*^2); \quad Q_t \sim u_*^3.$$

Entonces, para que  $d\eta/dt$  sea proporcional a  $Q_t$ , es necesario que  $n = 1$  y, como consecuencia,

$$d\eta/dt = -f_{12} = -\gamma u_*^3 \rho_0 / (\Delta \rho g \eta), \quad (19)$$

donde  $\gamma$  es una constante universal, la que puede ser determinada con ayuda de los datos de mediciones. Para un valor aproximado de  $\gamma$  fueron consideradas las condiciones estacionarias durante las cuales  $u_* = \text{Const}$ . En este caso, la ecuación (19) con la condición (14) admite una solución parcial de  $\eta = [\eta_0^2 - 2\gamma u_*^3 \rho_0 t / (\Delta \rho g)]^{1/2}$  y el valor de  $\gamma$  pueda ser expresado a través del tiempo  $T_t$  de la transición completa de la película a la emulsión como  $\gamma = \eta_0^2 \Delta \rho g / (2 u_*^3 \rho_0 T_t)$ .

La definición del tiempo  $T_t$  estaba basada en el concepto de tiempo de “semi-vida” de Cormack (1983), según el cual, el hidrocarburo después del derrame se desplaza primero sin dispersión hasta alcanzar un cierto espesor ( $\approx 0.5$  mm) y después, los procesos de dispersión predominan con un “semi-tiempo” de  $t_{0.5} = 12$  h sin dependencia del tipo de hidrocarburo. Luego, se tomó  $T_t = T_{\max} + 6 t_{0.5}$  y en los experimentos numéricos se definió que  $\gamma = 1.1 \cdot 10^{-6}$ .

En la versión actual del modelo este concepto fue modificado y la dinámica de emulsión no fue presentada por la ecuación (13), sino aplicando los trazadores lagrangianos. En forma análoga a las ecuaciones (2), en la vertical, fue establecida una componente determinística de la velocidad vertical  $\langle w(x,y,z,t) \rangle$ , una velocidad de gravedad por efectos de boyancia  $w_{ok}$  y las fluctuaciones turbulentas  $w'(x,y,z,t)$ . Aquí,  $w_{ok}$  generalmente depende del tamaño de gotas de aceite. Si identificamos con las coordenadas  $\tilde{X}_k$ ,  $\tilde{Y}_k$  y  $Z_k$  las partículas de crudo en el estado de emulsión, las respectivas ecuaciones de su dinámica serán:

$$\frac{d\tilde{X}_k}{dt} = \langle u \rangle + u'_k, \quad \frac{d\tilde{Y}_k}{dt} = \langle v \rangle + v'_k, \quad (20)$$

$$\frac{dZ_k}{dt} = \langle w \rangle + w_{0k} + w'_k \quad (20)$$

Las dos primeras ecuaciones en (20) son semejantes a (2), aunque se aplican para el campo cinemático de tres dimensiones y para otra clase de partículas. La velocidad de "surgencia" de las gotas  $w_{0k}$  se define como:

$$w_{0k} = \frac{g d_k^2 (1 - \rho_0 / \rho)}{18 \nu} \quad (21)$$

para las gotas de diámetro  $d_k < \frac{9.52 \nu^{2/3}}{g^{2/3} (1 - \rho_0 / \rho)^{1/3}}$  (Aravamudan et al., 1982).

Los procesos en la vertical (según (20)) deben ser definidos con mayor precisión que en la horizontal, según (2), por más de una razón: a) existe una variabilidad más rápida en la vertical; b) los vórtices turbulentos tienen menor "tiempo de vida", y c) la estructura vertical de las corrientes puede ser importante para la simulación de los procesos de difusión.

Usualmente, el nivel de clausura de los momentos turbulentos en los modernos modelos hidrodinámicos es relativamente alto para poder considerar no solamente la turbulencia (coeficiente  $K_z$  en la vertical), sino también la energía cinética  $b$  de turbulencia y la tasa  $\varepsilon$  de su disipación. Estas características permiten introducir la ecuación de Langeven

$$\frac{dw'_k}{dt} = -\alpha w'_k(t) + \lambda \xi(t), \quad (22)$$

para las pulsaciones  $w'_k$  en (20).

La ecuación (22) es diferencial-estocástica con los coeficientes  $\alpha$  y  $\lambda$ , los cuales se puede determinar por la covarianza  $\langle w'_k(0)w'_k(t) \rangle$  y dispersión  $\langle w_k'^2(t) \rangle$  del proceso estocástico  $w'_k(t)$  (Averina et al., 1992). La ecuación (22) describe un proceso de Markov, además, el movimiento de partículas está expuesto a las perturbaciones estocásticas y fuerzas de desaceleración.

La relación entre la cadena de Markov y la ecuación de Langeven fue establecida por Averina et al. (1992) y la velocidad vertical se determina en este caso, como:

$$w'_k(t + \Delta t) = A w'_k + B \sigma \xi(t) + C,$$

$$w'_k(t=0) = 0, \quad (23)$$

$$A = \exp(-\Delta t / T_L); \quad B = (1 - A^2)^{1/2};$$

$$C = (1 - A) T_L \frac{\partial \sigma^2}{\partial Z}, \quad (24)$$

donde  $\sigma$  es el r. m. s. de las fluctuaciones de velocidad y  $T_L$  es la escala integral de tiempo

$$T_L = \frac{c_\mu b}{c_0 \varepsilon}, \quad (25)$$

con  $c_\mu = 0.08$  y  $c_0 = 0.3$ .

El paso de tiempo en (23) se selecciona en la siguiente desigualdad:  $T_\lambda \ll \Delta t \ll T_L$ , donde  $T_\lambda = (15\nu/\varepsilon)^2$  es la micro-escala de Taylor de la autocorrelación de Lagrange. Los valores  $\sigma$  y  $T_L$  dependen de las coordenadas y el tiempo y pueden ser identificados del modelo hidrodinámico y de  $\sigma^2 = c_0 b$ .

## INTERFACE AMIGABLE

Como se ha podido apreciar el empleo del modelo puede ser complejo, dada la diversidad de parámetros que el usuario o investigador debe manejar, para definir los elementos de entrada, en el caso particular en que se requiera.

No hay tiempo de espera en el caso de un accidente, solo de presentar lo más pronto posible un pronóstico acertado y oportuno con el que las autoridades competentes puedan tomar las medidas preventivas para la mitigación de un desastre, por lo que fue necesario desarrollar una interface amigable al modelo para de esta forma disponer de un sistema de predicción de la trayectoria de manchas de hidrocarburos derramadas que responda a estas necesidades.

La interface amigable fue desarrollada en ambiente de ventanas, haciendo transparente al usuario los programas, datos y su manejo y está apoyada en un sistema de ayudas que documenta cada uno de los procedimientos a realizar. La implementación se realizó con el lenguaje de programación orientado a objetos Microsoft Visual C++ e interactuando con los programas escritos en lenguaje de programación Fortran, mientras que para la entrega de resultados el sistema automatiza procesos de graficación empleando SURFER

(Golden Software Inc.). El sistema cuenta con módulos para los diferentes procesos, entre los que se presentan los siguientes:

Definición de parámetros de temperatura, salinidad en cuatro niveles de profundidad en las fronteras abiertas del modelo (Figura 1), selección o especificación del patrón de viento a emplear durante el período de pronóstico en el modelo (Figura 2), determinación y especificación de la marea a emplear en el contorno de dominio del modelo, a partir de las alternativas: definición de armónicas principales, especificación de pleamares y bajamares tomadas de la tabla de mareas del IDEAM y del pronóstico del SHOM de Francia (Figura 3).

Además, se dispone la definición de los parámetros de identificación del hidrocarburo derramado en el accidente (Figura 4).

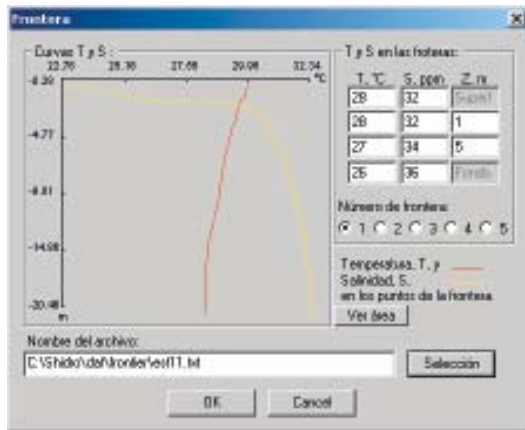


Figura 1. Condiciones de contorno en las fronteras abiertas del dominio del modelo.

Para la obtención de resultados se dispone del estado de la mancha, parámetros físicos del hidrocarburo y pronóstico de la trayectoria de la mancha derramada, demostradas en las Figuras 5 a 9.

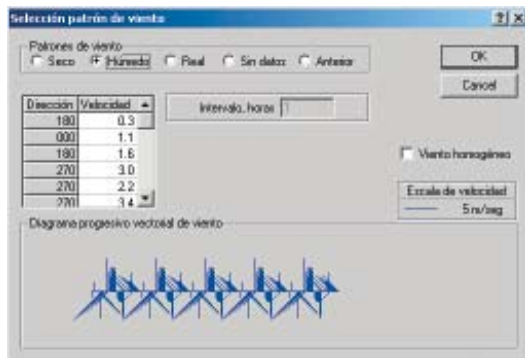


Figura 2. Especificación del comportamiento de viento antes y durante el derrame.

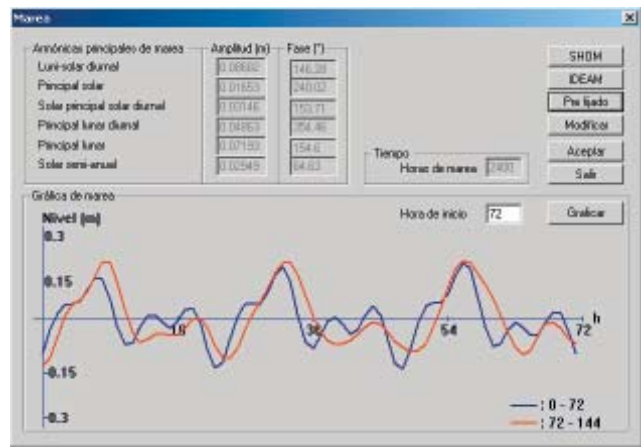


Figura 3. Especificación de la marea en las fronteras abiertas del dominio.

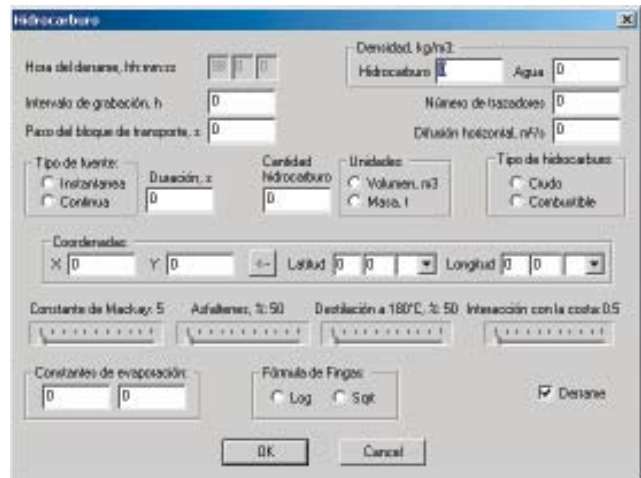


Figura 4. Especificación del tipo de hidrocarburo derramado.

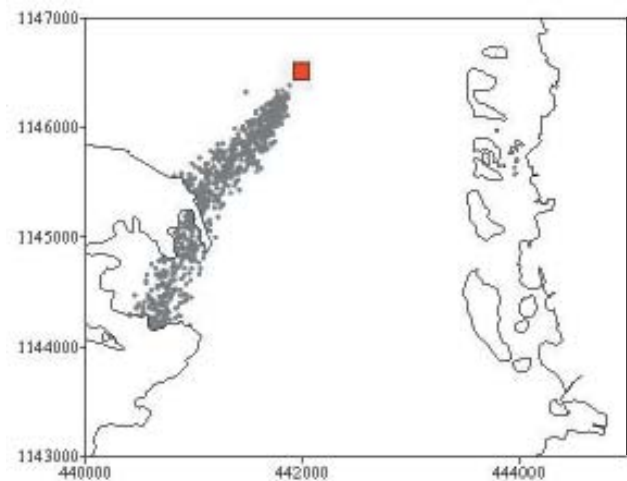
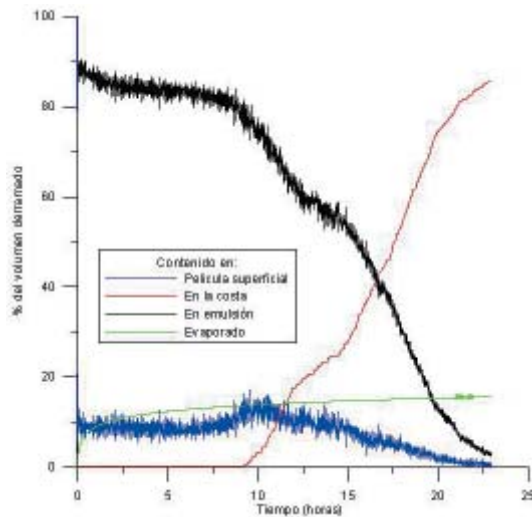
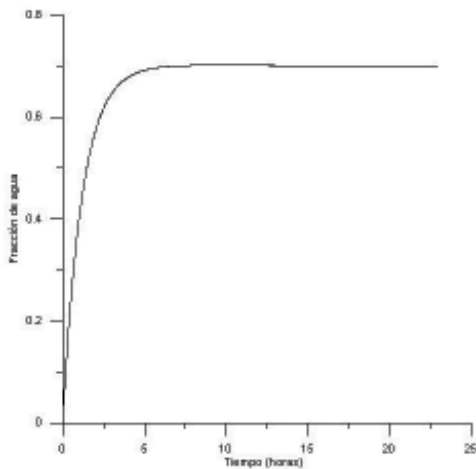


Figura 5. Desplazamiento de la mancha de hidrocarburo en la superficie de la Bahía de Cartagena después de un derrame hipotético en el punto rojo.

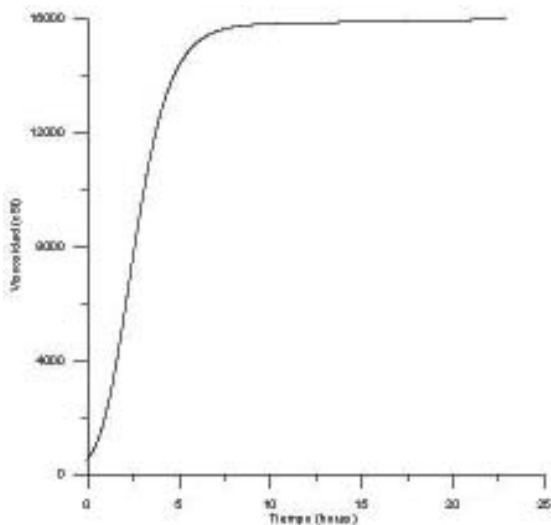




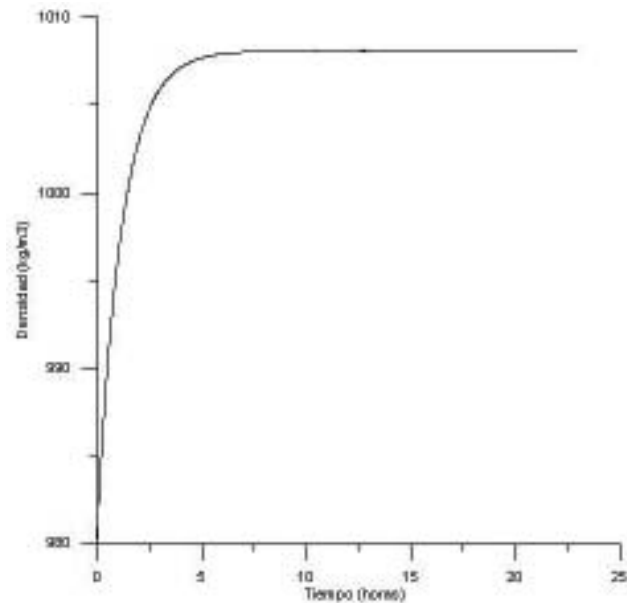
**Figura 6.** Comportamiento temporal del estado de la mancha después del derrame.



**Figura 7.** Comportamiento temporal de la fracción de agua en la emulsión "agua en aceite".



**Figura 8.** Comportamiento temporal de la viscosidad de emulsión "agua en aceite"



**Figura 9.** Comportamiento temporal de la densidad de emulsión "agua en aceite"

## DISCUSIÓN

La modelación del comportamiento de crudo en el mar es una tarea complicada, debido a múltiples mecanismos físicos, químicos y biológicos al contacto de hidrocarburos con el medio ambiente. Según la clasificación dada en Mackay & McAuliffe (1988), solo la expansión, evaporación y dilución de hidrocarburos se predice de manera excelente. La deriva de las manchas se describe satisfactoriamente, mientras que casi no hay formas de describir biodegradación y sedimentación (Bronfman & Khlebnikov, 1985). Tales procesos como dispersión ("aceite en agua"), emulsificación ("agua en aceite") y fotólisis se parametrizan de manera muy pobre.

Como fue mencionado en el texto, los procesos de fotólisis y biodegradación no son de nuestro interés, debido a que el primero predomina en tiempos de semanas y el segundo a partir de tres meses o años después del derrame, así que éstos no son del carácter operativo y están fuera de los propósitos del modelo. La dilución es poca (hasta 1-5% de la masa total), la evaporación cambia las propiedades físico-químicas del hidrocarburo, pero los principales mecanismos de su desplazamiento son efectos del viento, corrientes, oleaje y la dinámica propia de los crudos, así que el

éxito en la predicción de la posición de las manchas dependerá de la precisión de la definición de estos últimos.

La expansión del crudo, dada por la fórmula (8), de pronto, es la mejor formulación hasta el momento, puesto que no produce las manchas radiales casi nunca observadas en los casos reales (Mervin Fingas, comunicación privada), pero depende de la parametrización de turbulencia y de una única constante  $K_1$  que caracteriza el tipo de crudo. También, este proceso está designado para la simulación de las películas superficiales y no tiene en cuenta la formación de emulsiones de tipo “agua en aceite”, lo que satisface las condiciones relativamente calmadas en el mar, sin acción de olas y de viento fuerte.

La relación (10), supremamente empírica, se utiliza prácticamente en todos los modelos de la dinámica de derrames, pero no se analiza su aplicabilidad dentro de un modelo. El coeficiente  $K_w$  es el famoso 3% de la velocidad de viento con que se supone que la mancha se arrastra. Analíticamente este coeficiente se puede derivar, parametrizando la tensión de viento en la superficie del mar como  $\rho_a (u_{*a})^2$ , donde  $\rho_a$  es la densidad de aire y  $u_{*a}$  es la velocidad dinámica en el aire. Asumiendo la continuidad de flujo de impulso a través de la superficie del mar [ $\rho_a (u_{*a})^2 = \rho_w (u_{*w})^2$ ; el subíndice “w” indica las propiedades en el agua] y la estratificación neutral de la capa próxima de la atmósfera ( $u_{*a} \sim |W|$ ), el coeficiente  $K_w$ , entonces, meramente se define como la relación de densidades de agua y aire, es decir,  $K_w = (\rho_a / \rho_w)^{1/2}$ .

Es obvia la limitación de suposición sobre la estratificación de la capa próxima de la atmósfera y es absolutamente claro que la fórmula (10) con el primer término define las corrientes de deriva en la superficie, así que el segundo término no debe contener esta clase de corrientes en sí, lo que es imposible distinguir en un modelo hidrodinámico.

Los experimentos con las manchas de fluorocina en la Bahía de Cartagena (Lonin, 2004a) descubrieron la importancia de las corrientes de Stokes (Elliott, 1986), cuando la mancha tuvo un desplazamiento lento contra el viento (!), estirada por oleaje. Las corrientes de Stokes fueron incluidas desde entonces en la fórmula (10).

La dinámica de la mancha en tres dimensiones es una realidad. Las corrientes sub-superficiales pueden diferir tanto en direcciones como velocidades con la deriva superficial, así que el movimiento de gotas de “aceite en agua” tiene que ser definido. La parte crítica en esta definición es la parametrización del flujo de hidrocarburo desde la superficie. Fueron probadas tres distintas descripciones: la nuestra, dada por la fórmula (19), la de Reed (1989) y la de Delvigne & Sweeney (1988). La última se utiliza actualmente en el modelo, pero no está libre de la crítica: el flujo de aceite depende de un umbral de viento, simulando el inicio de rompimiento de olas, y parece que sobrestima la cantidad de sustancia penetrada a la columna de agua.

De todas formas, la parte más crítica en la predicción de manchas derramadas es el conocimiento de la dinámica de agua y habilidad de predicción de vientos. Implementar un modelo de derrames para un área, primero que todo, significa implementar y verificar el respectivo modelo hidrodinámico. Para el caso de la Bahía de Cartagena este proceso fue efectuado en Lonin (2004b).

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aravamudan, K., P. Raj, J. Ostlund, E. Newman y W. Tucker (1982). *Break up of oil on rough seas - simplified models and step-by-step calculations. US Coastguard Rep. CG-D-28-82, U.S. Dep. of Transp.*
- ASCE Task Committee on Modeling of Oil Spills of the Wat. Res. Eng. Div. (1996). State-of-the-Art Review of Modeling Transport and Fate of Oil Spills. *J. of Hydraul. Eng.*, 122 (11), pp. 594-609.
- Averina, T. A., N. V. Dmitriev y K. K. Sabelfeld (1992). Admixture transfer simulation for the upper turbulent layer of water basin. Preprint 965, Novosibirsk (in Russian).
- Bronfman, A. M. y E. P. Khlebnikov (1985). *The Sea of Azov: Fundamentals of Reconstruction*. Gidrometeoizdat, Leningrad. (in Russian).
- Cormack, D. (1983). *Response to oil and chemical marine pollution*, Applied Science Publishers, London.
- Delvigne, G. A. L. y C. E. Sweeney (1988). Natural dispersion of oil. *Oil Chem. Pollut.*, 4, pp. 281-310.
- Elliott, A.J. (1986). Shear Diffusion and the Spread of Oil in the Surface Layers of the

- North Sea. *Dt. hydrodr. Z.* 39 (H3), pp. 113-137.
- Fingas, M. (1996). The evaporation of crude oil and petroleum products, M.Sc. thesis, Department of Natural Resource Sciences, McGill University.
- Gundlach, E. R., M. O. Hayes, C. H. Ruby, L. G. Ward, A. E. Blount, I. A. Fisher y R. J. Stein (1978). Some guidelines for oil-spill control in coastal environments, based on field studies of four oil spills. *ASTM Spec. Techn. Publ.*, (659), pp. 98-118.
- Kraus, E. B. (1972). *Atmosphere-ocean interaction*. Clarendon Press, Oxford.
- Lonin, S. y L. Giraldo (1995). Circulación de las aguas y transporte de contaminantes en la Bahía Interna de Cartagena. *Boletín Científico CIOH*, (16), pp. 25-56.
- Lonin, S. A., y Yu. S. Tuchkovenko (1995a). Optimisation of location of source of industrial contamination in the sea (using the oil terminal in the Odessa region as an example). *Conf. Preprints "Environmental Protection Technologies for Coastal Areas"*, pp. 31-39, Bulgaria, 13-15 June 1995.
- Lonin, S. A. y Yu. S. Tuchkovenko, (1995b). On the problem of 3-D model development for oil spill evolution in the marine environment. *Meteorology, Hydrology and Climatology*, 32, pp. 207-214.
- Lonin, S. A. (1997). Hydrodynamic Modelling and the Problem of Oil Spills on the Colombian Caribbean Shoreline. *Spill Technology Newsletter*, 22 (1-4), pp.1-6.
- Lonin, S.A. (1999), Lagrangian model for oil spill diffusion at sea. *Spill Science & Technology Bulletin*, 5, (5/5-6), pp. 331-336.
- Lonin, S. A. (2001). Modelación Numérica de Derrames de Crudo y un Concepto del Problema Inverso. *Boletín Científico CIOH*, (19), pp. 15-22.
- Lonin, S. (2004a). Actualización del sistema de predicción de la trayectoria de manchas de hidrocarburos, derramadas en la Bahía de Cartagena (ASHIDRO). Informe técnico, CIOH.
- Lonin, S. (2004b). Documento de validación (modelo CODEGO, v. 2.2). Basado en: "Guidelines for documenting the validity of computational modeling software". IAHR, June 1994.
- Lonin, S., J. C. Anduckia, C. Parra, y Molaes R. (2003a). Modelo de circulación oceánica con asimilación de datos para el Caribe aplicado en derrames de hidrocarburos, pesquería y búsqueda y rescate. *Contribución en las Ciencias del Mar en Colombia*. Universidad Nacional de Colombia, pp. 103-120.
- Lonin, S. A., Anduckia J. C., Parra C. A., y Molaes, R. J. (2003b). Sistema de pronóstico de las condiciones oceanográficas del Mar Caribe para operaciones navales. *Boletín Científico CIOH*, (21), pp. 8-27.
- Mackay, D., Buist I., Mascarenhas R., y Petersen S. (1980). Oil Spill Processes and Models. Environmental Protection Service, Canada, Report EE-8.
- Mackay D., y C. D. McAuliffe (1988). Fate of hydrocarbons discharged at sea. *Oil Chem. Pollut.*, 5 (1), pp. 1-20.
- Monin, A. S., y A. M. Yaglom (1971). *Statistical Fluid Mechanics. 1*, MIT Press, Cambridge, 696 p.
- Nelson-Smith, A. (1972). *Oil pollution and marine ecology*. London.
- Phillips, O. M. (1977). *The dynamics of the upper ocean*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Reed, M. (1989). The physical fates component of the natural resource damage assessment model system. *Oil Chem. Pollut.* 5, (2-3), pp. 9-123.
- Stoker, H.S. and S.L. Seager (1977). Pollution of organic matter. In: *Environmental Chemistry*, J. O'M. Bockris (Ed.), Plenum Press, New York, pp. 346-370.
- Zhurbas, V. M. (1978). Basic mechanisms of oil spread in the sea. *Itogi nauki i tekhniki. Mekhanika zhidkosti i gaza*, 12, VINITI Publ, Moscow, pp. 144-159. (in Russian).

#### AGRADECIMIENTOS

El trabajo fue desarrollado en Colombia dentro de los siguientes proyectos: "Modelación Numérica de la Circulación Costera y su Aplicación al Estudio de los Procesos de Transporte de Sustancias Contaminantes en el Litoral Caribe Colombiano" (Cod. 0140-09-347-95), DIMAR-COLCIENCIAS, Colombia (1995-1998); "Actualización del sistema de predicción de la trayectoria de manchas de hidrocarburos, derramadas en la Bahía de Cartagena" (ASHIDRO, CIOH - 2004); proyecto "Modelación numérica aplicada a las operaciones de Búsqueda y Rescate en el Mar Caribe", DIMAR, 2001-2002 y "Validación y Operacionalización del Modelo Numérico de Búsqueda y Rescate, CODEGO y PROPAS en las Unidades de la Armada Nacional", DIMAR, 2003.