

MODELACIÓN NUMÉRICA DE DERRAMES DE CRUDO Y UN CONCEPTO DEL PROBLEMA INVERSO

Serguei A. Lonin¹

RESUMEN

Se utilizó el concepto de problema inverso como complemento a los resultados del trabajo de modelación numérica de derrames de hidrocarburos previamente realizado. Este concepto contempla dos partes: La búsqueda de la posición de derrame a través del método modificado de prueba y error y la determinación del volumen derramado, solucionando las ecuaciones conjugadas de transporte de la mancha.

ABSTRACT

The inverse problem in numerical modeling of oil spill is used as an extension of previous work. This concept consists of two parts: a) Spill position search through the modified method of trial and errors and b) Spill volume determination solving the conjugate equations of the slick transport.

1. Ingeniero oceanólogo, Ph.D. E-mail: slonin@sirius.enap.edu.co

INTRODUCCIÓN

Durante el período comprendido entre 1995 y 1998, el CIOH desarrolló un sistema de pronóstico de derrames de hidrocarburos para las tres zonas de alto riesgo en el litoral Caribe colombiano: el Golfo de Morrosquillo, el área de Santa Marta y la Bahía de Cartagena; el cual ha sido utilizado en varias aplicaciones de estudios del medio marino.^{2, 3, 4}

Para estudiar el comportamiento de una mancha de crudo derramada es necesario considerar de manera acoplada los procesos físicos ambientales y las propiedades fisicoquímicas del hidrocarburo. Es por esta razón que el sistema desarrollado incluye un modelo acoplado océano-atmósfera para la plataforma continental entre Riohacha y el río Sinú y los modelos hidrodinámicos incluido el bloque de crudo para las tres zonas de probable impacto.

El modelo acoplado permite pronosticar el comportamiento de los principales parámetros hidrometeorológicos y fue creado con base en los modelos oceánicos POM (*Blumberg & Mellor, 1987*) y meso - meteorológico de la capa límite de la atmósfera MOHAN (*Kazakov et al., 1996*); mientras que el modelo hidrodinámico para las zonas de impacto (CODEGO CIOH) se basó en el MECCA (*Hess, 1989*).

Como se estableció en los estudios de sensibilidad del modelo de derrame de crudo, para el caso de la Bahía de Cartagena el modelo fue muy sensible a los datos sobre el viento (dirección e intensidad), mucho menos

sensible a la información sobre la marea y a su variabilidad espacial y prácticamente insensible a los datos hidrológicos y los demás parámetros meteorológicos (*Otero y Pineda, 1998*). Esta observación no es válida para las áreas oceánicas como el Golfo de Morrosquillo y el área profunda de Santa Marta, donde el patrón oceánico de la circulación es predominante.

Cuando se observa una mancha de hidrocarburo en el mar es necesario considerar elementos de carácter externo: la posición del derrame, su intensidad, duración y finalmente, la cantidad total de hidrocarburo que ha sido derramado, en este caso la tarea se convierte en un problema inverso porque se hace necesario determinar la posición y/o la cantidad de derrame según observaciones sobre la posición, la forma y en lo posible las características físico - químicas del hidrocarburo en el agua, unas horas después del derrame. El objetivo del estudio fue el de dar una imagen del tema y formar un concepto teórico del desarrollo de los problemas inversos en este sentido.

En la práctica mundial dicho problema se resuelve en forma muy sencilla, pero no garantiza siempre el éxito de la simulación en escalas pequeñas. Esta circunstancia fue el incentivo para desarrollar el presente estudio.

BASES CONCEPTUALES

Determinación del sitio del derrame mediante la metodología convencional

Usualmente, para determinar el sitio del derrame, se utilizan los modelos con el recorrido hacia atrás, es decir, los campos vectoriales del viento y las corrientes se colocan con el signo menos y la dispersión no se tiene en cuenta. En algunos casos, un factor probabilístico se introduce para reducir el error

² Boletín Científico CIOH número 16 (1995)

³ Boletín Científico CIOH número 17 (1996)

⁴ Boletín Científico CIOH número 18 (1998)

relacionado con la ausencia del proceso de difusión en los modelos de este tipo. El modelo de transporte, en general, es un modelo en coordenadas de Lagrange.

Esta metodología es válida siempre y cuando se consideren escalas espaciales pequeñas y no existan bifurcaciones en la ruta de la mancha después de cierto tiempo de evolución.

Esta situación de bifurcación se presenta en la bahía de Cartagena (figura 1) y su alta probabilidad de ocurrencia se explica con la ayuda de las figuras 2 y 3

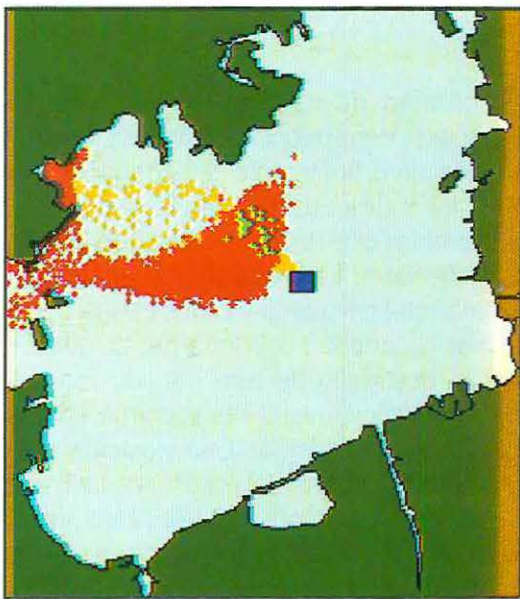


Figura 1. Comportamiento de una mancha de petróleo en la bahía de Cartagena, después de un derrame hipotético en el punto marcado por el cuadrado azul. Las partículas rojas presentan la posición de la mancha luego de 24 horas; las amarillas – la huella histórica; las verdes – emulsión “aceite en agua”. Un escenario simulado para la época seca.

Según la Figura 2, la intensidad del viento superó el valor de 5 m s^{-1} en las horas 6, 7 y 17 después del derrame. Teniendo en cuenta que este valor es el umbral del viento para la

emulsificación (Spaulding et al., 1993) con formación de gotas de aceite en agua, una parte de crudo se fue de la superficie y penetró a la columna de agua. En las horas 6 y 7 la cantidad de crudo en emulsión llegó hasta un 75 % de la masa inicial, y para la hora 17, el crudo nuevamente se emulsificó desde 8 hasta 35 %.

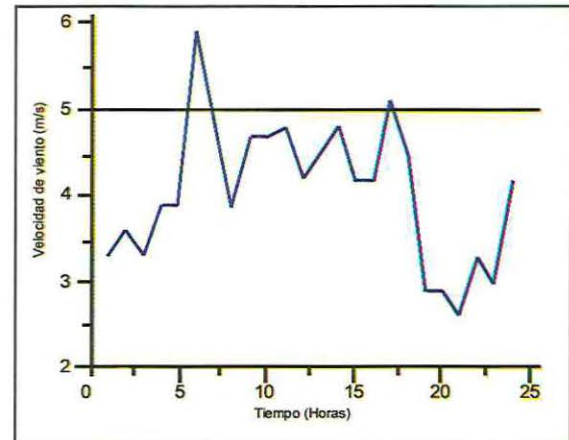


Figura 2. Comportamiento del viento durante el período de cálculo. Se ha marcado el umbral del viento (el valor de 5.0 m s^{-1}) para emulsificación del crudo.

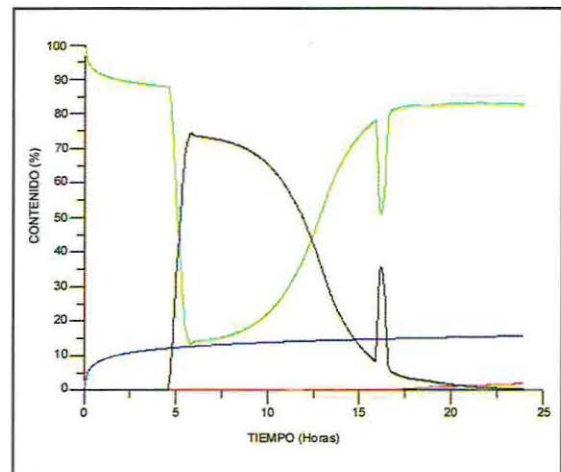


Figura. 3. Comportamiento temporal de la masa de crudo (en % de la masa inicial) en la superficie (línea verde), en la emulsión (negra), la parte evaporada (azul) y en la costa (roja). El mismo escenario de la época seca.

De esta forma, observando la Figura 1, es claro que el comportamiento del crudo derramado inicialmente en la superficie de agua fue debido a la influencia del viento y las corrientes superficiales, 6 horas más tarde una gran parte (75%) del hidrocarburo se sumergió, mientras que el resto continuó su desplazamiento superficial evaporándose (huella amarilla en la Figura 1). La parte emulsificada sufrió la influencia de otro sistema de corrientes en la columna de agua mientras hubo debilidad en el viento; después de un lapso de tiempo, apareció nuevamente en la superficie desplazándose en otra dirección.

Para el caso en que se conozca la posición de la mancha después de 24 horas de un derrame, no es posible hallar el centro de masa de la mancha y por supuesto, la metodología de pasos negativos en el tiempo, da un resultado equivocado. El método tampoco podría dar respuesta sobre la cantidad de crudo derramado. La solución a este problema se debe hallar en el desarrollo de otro método, que esté en capacidad de resolverlo.

Determinación de la cantidad de crudo derramada a partir de la teoría de funcionales y el problema conjugado

En el estudio de problemas inversos se considera el análisis de la señal de salida para la determinación del estado inicial del sistema y sus propiedades internas. Para la solución de problemas inversos existen varios métodos, dentro de los cuales se pueden señalar los trabajos del académico Guriy Marchuk (*Marchuk & Penenko, 1979*). La experiencia del autor está relacionada con la aplicación de esta teoría al estudio de factibilidad de la construcción de un terminal petrolero en el Mar Negro (*Lonin & Tuchkovenko, 1995*).

La formulación del problema en general, se plantea de la siguiente forma: Se supone que en el momento $t = T$ después del derrame, se conoce la forma y ubicación de la mancha. Esta información puede ser obtenida a través de observaciones aéreas (fotografías) u otros tipos de observación. El momento T también puede determinarse a través de muestreos físico - químicos de la mancha, conociendo el tipo de crudo y sus características de envejecimiento. La tarea será hallar la posición de derrame (x_0, y_0) y su volumen V_0 .

El planteamiento físico del problema se hace a partir de una ecuación funcional para la concentración de crudo, que permite la valoración de su evolución en el espacio y el tiempo.

La solución de esta ecuación se obtiene empleando herramientas de análisis funcional que permiten finalmente determinar la masa total del hidrocarburo menos las pérdidas relacionadas con procesos de evaporación y emulsificación. La comparación directa entre la masa total calculada y la observada permite estimar la cantidad del derrame. La dificultad para el desarrollo de este método radica en que la posición inicial del derrame debe ser una variable conocida. Esta posición puede determinarse a partir del espesor de la mancha en el momento de observación. Usualmente, el valor del espesor no es conocido por mediciones ni se conoce su variabilidad espacial, por lo cual, es difícil cerrar el problema completamente. Una de las alternativas para hallar la posición (x_0, y_0) , paralelamente a la búsqueda del volumen derramado, es la utilización de la teoría de perturbaciones pequeñas, de igual manera como fue realizado en *Lonin y Giraldo (1996)*, en la restitución de los campos de viento a través de las mediciones en algunas estaciones terrestres.

Sin embargo, dicha teoría sirve solamente cuando se tiene que precisar la posición en

una vecindad pequeña de (x_0, y_0) . En el caso cuando las coordenadas (x_0, y_0) pueden variar dentro de Ω completamente libres, parece que la alternativa del método de prueba y error, modificado para aumentar su eficiencia desde el punto de vista computacional, es razonable. Este método permite encontrar las coordenadas (x_0, y_0) , variándolas K veces, cuando K es un número grande y la cantidad enorme de tareas permiten examinar las posibilidades (en el sentido finito y discreto), comparando los resultados con la posición de la mancha observada Ω_+ en el momento $t = T$.

RESULTADOS

La Figura 4 muestra la distribución inicial de las "fuentes", distribuidas uniformemente en la Bahía de Cartagena. Entonces, el problema inverso se convierte en un problema directo pero, con una cantidad enorme (teóricamente infinita) de fuentes. La única diferencia con el "método de prueba y error", está en el uso simultáneo de todas (K) las partículas que ahora representan fuentes individuales, distribuidas continuamente en el dominio del cálculo. Además, en este problema se establece el flujo específico de interacción "crudo - costa" $Q_b = 0$, debido a que si Q_b no es igual a 100 % para el crudo dado, entonces existe un porcentaje de la masa que no interactúa con la costa, suposición válida considerando el número de partículas ($K \neq \infty$).

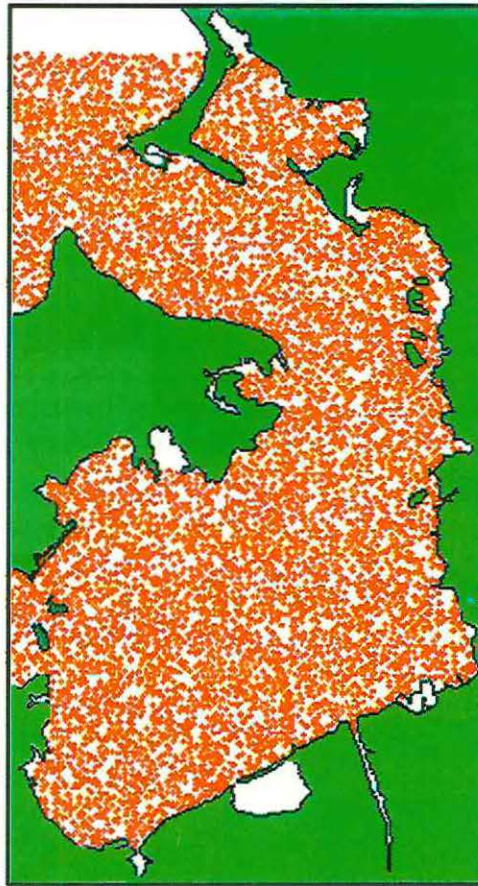


Figura 4. Distribución cuasi - uniforme de las fuentes de derrame para el momento inicial. Cantidad de partículas $K = 10^4$.

La Figura 5 muestra el resultado del cálculo en términos probabilísticos. El cuadrado indica la zona de observación donde se supone hipotéticamente la posición de la mancha de crudo, observada 24 horas después del derrame. Entonces, conociendo esta zona y corriendo el modelo, basado en la teoría descrita anteriormente, es posible construir el campo de probabilidad para el sitio del derrame. Según la Figura 6, el sitio más probable está dentro de los contornos de color amarillo (más alta probabilidad).

Para validar la metodología, en la Figura 6, se muestran los resultados del pronóstico obtenido por el modelo de derrame del CIOH, señalado en la introducción.

Las condiciones ambientales para el modelo directo e inverso fueron tomadas de igual forma. Se consideraron las condiciones de calma para mostrar el comportamiento de la mancha bajo la influencia (predominante en este caso) de la marea y el aporte del Canal del Dique. Adicionalmente, la ausencia del viento evitó la formación de emulsiones y esto simplificó el resultado y su análisis. El sitio de derrame se ha seleccionado según la Figura 6 en la zona de más alta probabilidad. La Figura 6 muestra el proceso de desplazamiento de la mancha superficial durante 24 horas desde el punto seleccionado en la Figura 5. Bajo la influencia de la marea, en las primeras 12 horas la mancha estaba saliendo de la Bahía, pero después del

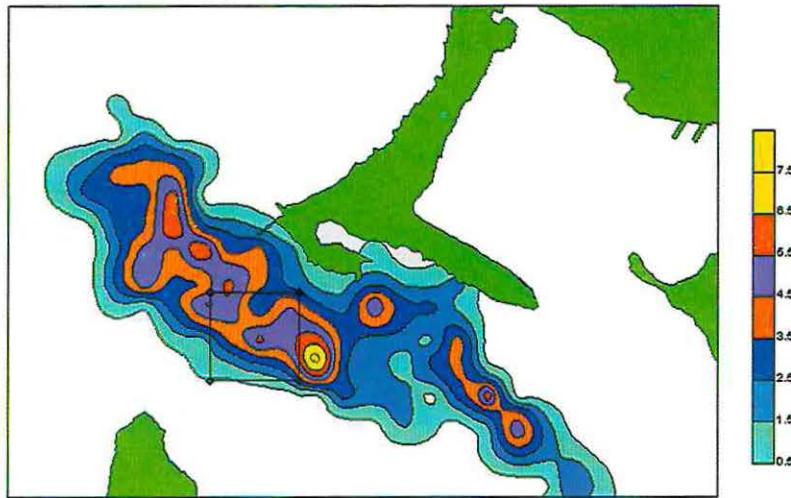


Figura 5. Distribución de la probabilidad (en unidades relativas) de localización del punto de derrame, si la mancha aparece en el cuadrado (sitio de observación de la mancha) después de 24 horas.

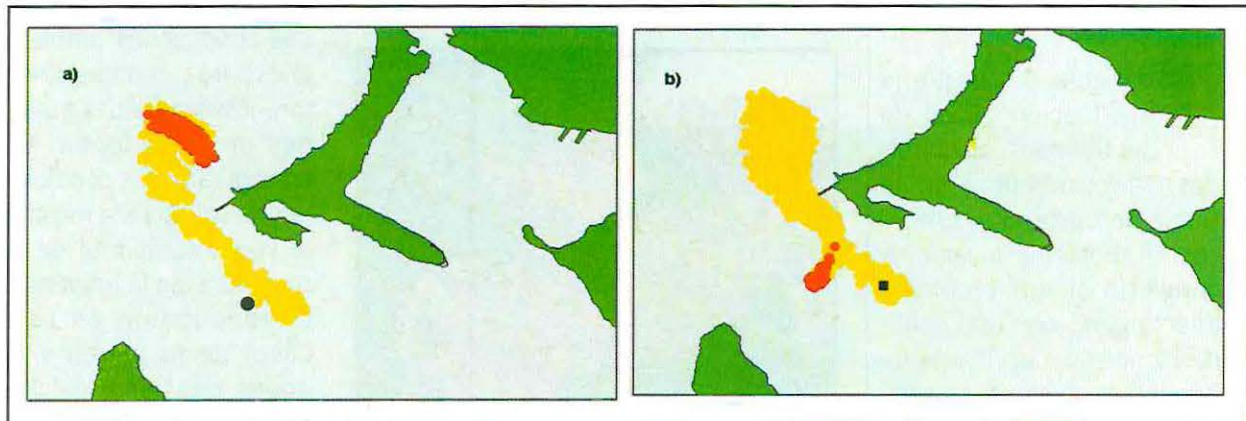


Figura 6. Verificación del problema inverso a través de la solución del problema directo. Posición de la mancha (color rojo) en 14 (a) y 24 (b) horas después del derrame en el sitio marcado por el punto negro (ver Figura 6). Color amarillo presenta la huella histórica.

cambio de fase, comenzó a entrar. Finalmente, la mancha llegó a la zona indicada en la Figura 5 por el cuadrado. Esta es una evidencia del beneficio de la metodología presentada.

CONCLUSIONES

El concepto del modelo inverso está compuesto por dos partes: 1) Determinación del volumen derramado y 2) Búsqueda del sitio de derrame. Para resolver el problema se debe conocer el régimen detallado de la hidrodinámica de la zona, la posición ob-

servada de la mancha en un momento de tiempo y "la edad" de la mancha. El régimen se calcula a través de los modelos hidrodinámicos, la posición se determina por las observaciones de campo y se supone, que los análisis físico - químicos permiten obtener la información sobre el tiempo de permanencia en el agua.

El trabajo presenta los pasos necesarios para solucionar el problema, aplicando la teoría de los funcionales y desarrollando el problema conjugado. Además, se aplica una generalización del método de "prueba y error". Los resultados obtenidos en un solo ejemplo

son satisfactorios para concluir que el método tiene las bases para desarrollarse hasta su aplicación práctica.

El ejemplo fue sencillo. En la realidad, según la ocurrencia de los eventos de derrame en la Bahía de Cartagena, no se observa una sola, sino varias manchas al mismo tiempo y se supone que ellas provienen de una sola fuente. Desarrollando esta metodología resultaría interesante considerar estos eventos.

En el futuro, existe la necesidad de probar que el problema inverso es un problema unidimensional, es decir, que su solución es única para una información completa de entrada. La cantidad de derrame es una característica que afecta al proceso de dispersión de la mancha, por supuesto, determina su posición y finalmente, su configuración. Por esta razón, para unir las dos partes del problema (hallar el volumen y el sitio), no es suficiente conocer el lugar observado de la mancha en un tiempo T , sino que es importante observar la estructura de la mancha, es decir, su configuración espacial.

Se plantea involucrar el método al software creado por el CIOH en 1998 para las tres zonas del impacto probable: La Bahía de Cartagena, el Golfo de Morrosquillo y el área de Santa Marta.

BIBLIOGRAFÍA

Blumberg, A.F. y G.L.A. Mellor, Description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. Three-Dimensional Coastal Models, *Amer. Geophys. Unión, Wash., D.C.*, pp.1-16, 1987.

Hess, K. W., Mecca Program Documentation, *Reporte Técnico, NOAA, NESDIS 46, Wash., D.C.*, 200 p., 1989.

Kazakov, A.L., A. A. Lezhenin y L.S. Speranskiy, Resultados preliminares del estudio de la capa límite mesometeorológica de la atmósfera en la costa norte colombiana aplicando un modelo numérico, *Boletín Científico CIOH No 17*, pp. 17-26, 1996.

Lonin, S.A., Hydrodynamic modelling and the problem of oil spills on the Colombian Caribbean shoreline, *Spill Technology Newsletter*, Vol. 22 (1-4), pp. 1-6, 1997.

Lonin, S. A. y L. Giraldo, Sobre la restitución de los campos de viento a partir de observaciones en un área determinada, *Memorias IV Congreso Colombiano de Meteorología*, Santafé de Bogotá, IDEAM, pp. 37-42, 1996.

Lonin, S.A. y Y. S. Tuchkovenko, Optimization 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"*, Bulgaria, pp. 31-39, 1995.

Marchuk, G.I. y V.V. Penenko, Application of optimization methods to the problem of mathematical simulation of atmosphere processes and environment, *Proc. of the IFIP, B*, pp. 240-252, 1979.

Otero, L. e I. Pineda, Estudio de sensibilidad del modelo "CODEGO" de derrame de crudo, *Tesis de grado, Escuela Naval "Almirante Padilla"*, Cartagena, 96 p., 1998.

Spaulding, M., K. Jayko y W. Knauss, Hindcast of medical waste trajectories in southern new england waters, *Journal of N.E., Water Pollution Control Association 23(2)*, pp. 206-221, 1989.

Spaulding, M.L., A. Odulo y V.S. Kolluru, A hybrid model to predict the entrainment and subsurface transport of oil, *Spaulding environmental associates, Inc. (SEA)*, 1993.