

# Los accidentes por derrames de hidrocarburos en el mar. Historia de la modelación matemática de sus procesos físicos.

Autores: MSc. AMILCAR E. CALZADA ESTRADA<sup>1</sup>, DR. JOSÉ M. MARÍN ANTUÑA<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Instituto de Meteorología, amilcarce@yahoo.com/amilcarce@met.inf.cu, <sup>2</sup>Universidad de la Habana, marín@ff.oc.uh.cu

## Resumen

*El trabajo trata sobre un tema priorizado por todos los países que conforman el área del Caribe y el Golfo de México: los accidentes por derrame de hidrocarburos en el mar. Se introduce con una breve panorámica de la situación de las costas de la zona y el anuncio del peligro de una posible afectación.*

*Como primer resultado se obtiene un resumen que contempla los procesos físicos ocurridos en la mancha del hidrocarburo. Del mismo modo se brindan los detalles de cómo cada uno de ellos han sido modelados desde los primeros intentos hasta la actualidad. Una interesante relación de programas disponibles con sus principales características es mostrada, como reflejo de la evolución de la tecnología y medios computacionales en la simulación.*

*Unido al panorama histórico ofrecido, se exponen los resultados alcanzados por el departamento de Meteorología Marina del Instituto de Meteorología en torno al tema. Se aplica PHOENICS en escenarios de la plataforma insular cubana con muy buenos resultados. Datos del viento sobre el lugar y de las corrientes marinas en determinados puntos fueron empleados para alimentar el software, luego de un previo estudio de ambas series. Por último, se acopla el OILTRACK para obtener el campo final de las corrientes marinas en el transcurso del tiempo y se simula un derrame hipotético en la entrada de la Bahía de Cárdenas. Los principales resultados y conclusiones se exponen al final del trabajo, permitiendo de esta forma que los interesados en la temática logren detalles importantes para sus actividades.*

**Palabras claves:** Modelación de la mancha, oil track modeling.

## Introducción

En el mundo se ha ganado mucha comprensión acerca de la trascendencia medioambiental que tiene el derrame de petróleo en el mar; sin embargo, se conoce poco sobre la exposición y vulnerabilidad de las costas caribeñas al constante peligro de un hecho de esta naturaleza. Según las estadísticas generales de la Federación Internacional de Anticontaminación de Armadores de Buques Tanques sobre el tráfico marítimo de los petroleros en el área del Gran Caribe, se ha podido determinar que a lo largo del Canal Viejo de Bahamas se transportan aproximadamente 1,6 millones de barriles diarios de petróleo y sus derivados, lo que representa el 6,8% del transporte marítimo mundial de esos productos. Por otra parte, a través del Canal de Yucatán se transportan alrededor de 2,2 millones de barriles diarios para un 8,3%.

Un cuidadoso estudio de este volumen de tráfico, unido a la baja profundidad de las aguas adyacentes a los canales y las condiciones de vientos y corrientes en sentido contrario, dio por resultado la valoración de alto riesgo en los pasos navegables del canal de San Nicolás y el Canal Viejo de Bahamas. Esto favorece la ocurrencia de accidentes y hundimientos

de tanqueros en su tránsito. Estudios realizados por la OMI revelan que 7 millones de barriles de petróleo se incorporan a las aguas del Caribe como resultado, además de las descargas ilegales por lavado de los tanques comerciales de los buques petroleros, por la descarga de residuos de aguas con hidrocarburos procedentes de las sentinas de los buques y embarcaciones durante sus travesías y por las diferentes maniobras en las plataformas de extracción.

Con estas características tan desfavorables presentadas por las áreas referidas, es indispensable la existencia de una entidad que brinde elementos seguros y útiles en la toma de medidas. Este es precisamente el objetivo de la modelación de la trayectoria de los derrames de hidrocarburos, cuyos resultados pueden ser utilizados por aquellos que responden a las emergencias, por los planificadores de contingencias y por el personal de evaluación de riesgos, a fin de predecir hacia dónde se dirigirá el hidrocarburo derramado y de qué manera sus propiedades químicas y físicas habrán de cambiar con el tiempo. Esta simulación es también muy útil a la hora de utilizar técnicas de respuesta, pues concibiéndolas se podrían realizar nuevas corridas y obtener resultados cuyo balance económico-social sea más positivo.

## Objetivos

Con el trabajo pretendemos:

1. Promover el tema de la modelación físico-matemática de derrames de hidrocarburos en el mar como herramienta fundamental para planes de contingencias.
2. Acumular información histórica de la modelación de hidrocarburos en el ámbito mundial y actualizar los algoritmos de trabajo en Cuba.
3. Estudiar las posibilidades de obtener mayor exactitud en los resultados para realizar valoraciones más precisas y reales en los cálculos intermedios.
4. Valorar los procesos físicos posibles a describir en el trabajo inmediato por el departamento de Meteorología Marina.
5. Analizar el principal enfoque a tener en cuenta en posibles escenarios para describir fenómenos en áreas someras.

## Materiales y Métodos.

Se realizó una minuciosa búsqueda bibliográfica en torno a las principales técnicas de modelación de hidrocarburos, llevadas a cabo por empresas e instituciones de elevado prestigio en el ámbito mundial. Se insertaron varias propuestas de cambios dirigidas a combinarlas, tropicalizarlas e involucrar factores mesoescales que indudablemente influyen en el destino de las manchas, ya sea en mayor o menor medida. Con ello se elaboró un resumen con el ánimo de brindar actualidad a todo aquel que lo requiera.

El estudio del planteamiento del problema con sus condiciones de contorno e iniciales ocupó parte de nuestra labor por mediación de la revisión de libros y revistas especializadas en ecuaciones de la física-matemática, así como búsquedas de diferentes esquemas numéricos, enfatizando en la exactitud de cada uno de ellos. Se efectuó un análisis de los principales parámetros que están presentes en las ecuaciones para el cálculo de las corrientes marinas y del transporte del hidrocarburo, estudiando sus procedencias y el modo de calcularlos experimentalmente.

Fueron analizadas las salidas de un demo del programa OILMAP (EE.UU.) y se detallaron algunos de los resultados llevados a cabo por instituciones reconocidas como la universidad de Kyushu (Japón). Unido al estudio de estos modelos avanzados hemos decidido mostrar algunos resultados logrados por nuestro grupo de Meteorología Marina del Instituto de Meteorología, apoyados por la Facultad de Ingeniería del Instituto de Mecánica de Fluidos de la Universidad

Central de Venezuela. El sitio más utilizado para la aplicación de los cálculos es la Bahía de Cárdenas, Cuba. Los resultados que se mostrarán precisamente serán en ese dominio.

Se enriquecieron los modos de empleo de los Sistemas de Información Geográfica, para la inserción de los factores geográficos indispensables en los cálculos. Fueron valorados varios de los que han sido vinculados históricamente a este tipo de temas y el SPRING (versión 4.0) fue el sistema escogido para lograr el acople con el modelo hidrodinámico.

El diseño de los escenarios de prueba fue insertado en PHOENICS (de la cadena inglesa CHAM, muy utilizado en Cuba para diseñar calderas de vapor) versión 1.4, para luego efectuar las corridas de los cálculos de las corrientes marinas en la bahía [4]. Por último se utilizó el OilTrack (Venezuela, versión educacional) para definir exactitudes en los campos de dichas corrientes, estudiar sus variaciones en el tiempo y obtener simulaciones de derrames hipotéticos en ese dominio.

Previo al montaje e interacción PHOENICS – OILTRACK, se estudiaron una vez más las características de la bahía [5, 10, 11, 13]. Por último se incorporaron cada uno de los estados estacionarios obtenidos mediante el software inglés y se insertaron en OILTRACK, obteniéndose un resultado más acabado y real.

## Análisis de los Resultados.

### PRINCIPALES PROCESOS OCURRIDOS EN EL DERRAME

Entre los procesos naturales que se producen durante la presencia de la mancha se encuentran el Esparcimiento, la Advección, la Difusión, la Evaporación, la Disolución, la Dispersión, la Emulsificación, la Sedimentación y Sumergimiento, la Foto-oxidación, la Biodegradación y la Interacción con la línea de la costa. En dependencia de las características geográficas de la zona, el volumen del contaminante, la calidad del procesador y la finalidad de la simulación, podrá tenerse en cuenta la inclusión de cada uno de ellos.

### DETALLES HISTORICOS DE CADA PROCESO

Desde la segunda mitad del siglo XX y específicamente en los primeros años de la década del 60, los métodos de cálculo del transporte de las manchas de hidrocarburos han cobrado auge. Los físicos comenzaron por elaborar modelos simples, que luego de la aparición de las primeras computadoras, fueron adaptados a las capacidades técnicas de

aquellos medios de cómputo existentes [comentado en 1]. Con posterioridad a determinadas consideraciones del fenómeno, se dispusieron a describir los diferentes procesos que tienen lugar durante el derrame, analizándolos de forma independiente. A continuación se hará mención de los principales procesos y se realizará un breve comentario acerca de cómo fueron insertados a través de la historia.

Desde un principio los encargados de confeccionar los primeros modelos señalaron entre los procesos más rápidos el esparcimiento, el transporte (advección y difusión), la evaporación y la formación de emulsiones. El segundo de ellos ocupó mayor tiempo de estudio y especialmente el esparcimiento transcurrió por varias etapas, simulándose por disímiles métodos y técnicas.

Fay propuso en 1971 un modelo que proporciona una primera idea del proceso de esparcimiento, al menos en magnitud, en condiciones de mar en calma. El modelo ideado considera tres fases distintas [explicado en 1]:

**Fase Inercial:** Gobernada por la fuerza de gravedad, debido a la presión hidrostática del espesor de la película de hidrocarburo, la que es contrarrestada por las fuerzas de inercia. Ocurre en los primeros minutos y dura cerca de una hora.

**Fase Viscosa:** Donde la fuerza de gravedad continúa gobernando, pero en este caso retardada por las fuerzas viscosas. Su tiempo de duración es de alrededor de una semana.

**Fase de tensión superficial:** Caracterizada por la peculiaridad de que los efectos de la gravedad son atenuados por la disminución del espesor de la película y las fuerzas de tensión superficial van a gobernar su extensión, retardadas por la fuerza viscosa. La fase transcurre luego de la serpana del derrame.

En cuanto a las ecuaciones que describen este proceso, Bloker en 1964 [explicado en 16], aún sin definir de manera completa los detalles mencionados, propuso para describirlo una formulación matemática. Permack y Brown en 1975 [comentado en 16] representaron las tres fases mediante ecuaciones e hicieron aportes muy importantes.

En realidad, el modelo clásico de Fay, bautizado por varios entendidos como prueba de laboratorio, subestima el esparcimiento en condiciones reales. Presenta varias limitaciones, pues no toma en cuenta el efecto del viento, el oleaje, ni la degradación en el proceso de derrame. Además, el modelo se concibe como un esparcimiento radial simétrico de la mancha,

ignorando la deformación que esta sufre debido a la irregularidad de las corrientes marinas, geografía compleja y otros factores.

A pesar de todas las limitaciones, estas ideas iniciaron una etapa muy favorable. Entre los especialistas, dicho modelo es conocido como el momento donde se comenzaron a detallar los primeros cambios en función del tiempo, como resultado de la interacción de las fuerzas involucradas. Este ha sido el enfoque o punto de partida de muchos de los modelos que tratan el tema de los hidrocarburos y en especial del petróleo.

Con el tiempo, se propusieron varios cambios a estas formulaciones con el propósito de hacerlas más operativas y alcanzar los resultados en el menor tiempo posible. Uno de ellos, el proporcionado en el modelo de Mackay [referido en 1] usa la teoría de Fay, suponiendo que una mancha gruesa y pequeña se transforma en otra fina y extensa. Este método es más realista, pero se dificulta mucho el ajuste de sus coeficientes. Además, la limitación de no considerar las propiedades físicas del hidrocarburo y del agua de mar de forma explícita es, para muchos, una desventaja, pues esto hace que los resultados sean independientes de la sustancia derramada y del entorno.

Johansen [comentado en 7], por una parte, modeló el esparcimiento como un proceso de difusión, ajustando los coeficientes con las ecuaciones de Fay y el modelo de Elliot [referido en 8], por otra, une el esparcimiento a la distribución de masa de las gotas de petróleo y a los procesos de difusión por el cizallamiento de la corriente. Con el punto de vista de este último se obtienen resultados mucho más adecuados que los anteriores, especialmente desde la correcta simulación del esparcimiento en la dirección del viento con las gotas mayores en la cabeza de la mancha [explicado en 8].

El transporte de la mancha es otro proceso importante cuando se pretende simular su contenido. Algunos modelos lo tratan simplemente así, otros lo dividen en advección y difusión, y otros tantos incluyen el esparcimiento con estos efectos y lo modelan en conjunto. La mayoría de los creados en la década del 60 usan leyes empíricas que calculan la deriva sobre la base del viento. La velocidad de deriva, según experimentos, oscila de 2,5 a 4,4% de la velocidad del viento con un valor promedio de 3,5%; la dirección varía de 0 a 25 grados a la derecha en el hemisferio Norte (y a la izquierda en el Sur) con un promedio de 15 grados [comentado en 1 y 6]. Es usualmente posible adicionar alguna corriente de marea u otra permanente dada por una base de datos.

Generalmente se opera del siguiente modo:

Efecto del viento	Efecto de la corriente
$V_{xx} = -0.034V_v \cos\alpha$ (1),	$V_{xx} = V_c \operatorname{sen}\beta$ (2),
$V_{yy} = -0.034V_v \operatorname{sen}\alpha$ (3),	$V_{yy} = V_c \cos\beta$ (4),

Donde  $\alpha$  es el ángulo que forma la dirección de donde proviene el viento con la dirección norte y  $\beta$  el referido al formado por esta última dirección con la dirección a la que marcha la corriente.  $V_v$  y  $V_c$  son las velocidades del viento y la corriente respectivamente.

Movimiento de la Mancha.

$$V_x = -0.034V_v \cos\alpha + V_c \operatorname{sen}\beta \quad (5), \quad V_y = -0.034V_v \operatorname{sen}\alpha + V_c \cos\beta \quad (6),$$

y con ello la velocidad resultante será:

$$V_r = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad (7) \quad \text{y} \quad \theta = \operatorname{arctg}\left(\frac{V_y}{V_x}\right) \quad (8)$$

A pesar de lo cómodo y práctico que podría resultar el manejo de estos cálculos, se conocen las desventajas en cuanto a precisión que poseen estos métodos, porque la descripción está realizada con respecto al centro de masa de la mancha, sin ocuparse de las restantes partes que conforman su cuerpo. Es por ello que sus resultados, con frecuencia, no satisfacen la necesidad de información cuando se requiere del pronóstico a partir de condiciones reales. También influye el hecho de que los cálculos son de origen empírico y no siempre son útilmente aplicables en otras partes del mundo como las regiones tropicales, en ausencia del efecto de la continentalidad, etc.

La modelación de la evaporación ha sido, sin dudas, el propósito de muchos especialistas a través de los años, por tratarse de un factor fundamental que influye en las dimensiones de la nata [explicado en 2]. Aravamuda con su grupo en 1981 [comentado en 16] realizó un tratamiento para calcular el volumen y el área en las diferentes fracciones presentes. Otro modo de enfocar el asunto es la efectuada por Blokker y Mackay [referido en 16] considerando la capa como el promedio de las fracciones presentes en la mancha.

El modelo de Nadeau y Mackay fue otro que existió con muy buenas condiciones por resultar muy práctico en su cálculo numérico, pues muestra la evaporación en proporción con la temperatura superficial del agua, intensidad del viento, volatilidad del hidrocarburo y el tiempo de exposición al medio. Su limitación radica en la ausencia de gráficos presentados [explicado en 16].

Aunque ha atravesado por diferentes etapas, el futuro de la predicción de la dispersión continúa siendo la parametrización de los coeficientes básicos que conectan el movimiento de la mancha con el medio ambiente. Nihoul propuso un modelo matemático para predecir este efecto introduciendo una nueva parametrización de la tensión superficial y de la fricción en las ecuaciones de evolución [explicado en 16].

Los modelos actuales son muchos más exquisitos a la hora de simular los procesos, como por ejemplo la advección, que determina la deriva de la mancha, tanto en superficie como por debajo de ella y principalmente es concebida por la presencia de la corriente marina y por la tensión del viento sobre la superficie del mar. Es por ello que un análisis exhaustivo de estos campos son realizados a menudo con el objetivo de alcanzar resultados precisos, especialmente, si las condiciones morfológicas de la costa son complejas, si hay presencia de brisa marina, existencia de diferentes texturas en el fondo, etc.

La disolución no ha tenido un seguimiento marcado en la historia, pues no es determinante en la futura trayectoria. Actualmente aquellos que la tienen en cuenta la calculan por el método de Cohen. Huang y Monasero [referenciado en 1] sugirieron una idea que perdura, dando una ecuación para el petróleo típico.

Basados en la formulación de la mitad del tiempo de vida es que, en ocasiones, los modeladores estiman la deposición del hidrocarburo sobre la línea costera y así determinan el volumen de petróleo que permanece sobre la playa.

## DEFINICIÓN Y ANÁLISIS DE LOS MODELOS A CONSIDERAR.

Existen diferentes tipos de análisis que se realizan para enfrentar a un derrame desde el punto de vista físico-matemático. Tener siempre presente el propósito del diseño de la simulación, los medios para proceder y el tiempo en que se necesita la información resultante [3] es de gran importancia para la operatividad del trabajo. Justamente la realización de un balance óptimo entre estos detalles es lo correcto para evaluar y determinar si un modelo específico es exacto en uno u otro grado de aproximación. La modelación de un hidrocarburo complejo (que cambia constantemente) en un ambiente abierto, tridimensional, resulta ser un proceso extremadamente complicado que el software intenta imitar mediante el uso de ecuaciones matemáticas, las cuales invariablemente incluyen una gran cantidad de suposiciones. Esto explica el porqué se obtienen diferentes resultados a partir de diferentes modelos en medio de las mismas condiciones y por qué algunos de ellos funcionan mejor en ciertas circunstancias.

Los modelos, según los datos de entrada, pueden ser clasificados en tres tipos [explicado en 17]:

a) **El modelo determinista** que fija a donde se dirige un derrame determinado. Es el tipo de modelo donde los parámetros de entrada son determinados a partir de datos sinópticos o mesoescalares según la resolución del dominio.

b) **El modelo estocástico** que brinda las probabilidades de que los hidrocarburos lleguen a tierra si ocurre un derrame. Como resultado, se

requiere una cantidad considerable de datos de vientos históricos de una muestra de 10 a 30 años [explicado en 1 y 17].

c) **El modelo receptor**, que ofrece la información de la procedencia de los hidrocarburos. Es similar a los estocásticos salvo que el modelo se ejecuta en sentido inverso.

Algunos de los modelos que trabajan la simulación de la mancha de petróleo en el mar se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 1.1. - Descripción de varios modelos de trayectorias de derrames.

MODELO	BREVE DESCRIPCIÓN	PROCEDENCIA
MOTHY	Tiene en cuenta la distribución de gotas independientes que se mueven en respuesta al cizallamiento de corriente, de la turbulencia y a su flotabilidad.	Francia (METEO-FRANCE)
OILMAP	Provee una predicción rápida del movimiento de la mancha de petróleo y es instrumento importante para la elaboración de respuestas.	E. E. U. U. (ASA)
MOHID	Predice la evolución y comportamiento de los procesos esenciales, así como las propiedades del producto derramado en agua.	Portugal
OSIS	Modela el transporte de la mancha de manera precisa.	Reino Unido (BMT)
OILTRACK	Simulan la hidrodinámica de las aguas en zonas costeras y el transporte del contaminante en escenarios complejos.	Venezuela
OILTRAJ & SHOREDRIIFT	Simula el derrame en superficie (lejos de la costa y dentro de ella respectivamente).	Det. Norske Veritas.
OILSLICK, DIFF & KOHRYE	Procesan el comportamiento, las características y concentración de la mancha (tanto en la superficie, como por debajo de ella).	DNV
BLOW	Modelo de explosión de gas y petróleo.	DNV
DRILL	Simula los procesos de dispersión y sedimentación.	DNV
MURGOM	Genera el campo de corriente en el área despejada en condiciones diferentes.	DNV
ADIOS	Provee algoritmos de meteorización, es diseñado para tomar decisiones respecto a técnicas de respuestas.	EE UU. (NOAA)
COZOIL	Modelo de trayectoria del derrame con gran énfasis en la interacción con la línea de costa.	Alaska, EE UU.
OCEANOR	Modelo de servicio hidrometeorológico de marea y surgencia, empleado en aguas costeras muy útil para modelos de trayectoria de derrames.	Vietnam.
CORMIX	Realiza análisis y diseño de descargas de contaminantes en cuerpos de agua. Predice además, el comportamiento de la pluma de la descarga a grandes distancias.	EEUU.

## CARACTERÍSTICAS DE SIMULACIONES ACTUALES DE LA MANCHA DEL HIDROCARBURO EN EL AMBITO MUNDIAL.

La mayor parte de los programas de simulación confeccionados son bidimensionales, aunque cierta consideración puede darse al hundimiento y a la reflotación de las goticas (partículas) del derrame. Algunos modelos muy sofisticados y costosos son realmente tridimensionales, pero probablemente no sean necesarios en la mayoría de las aplicaciones de esta modelación. Asimismo, los datos complejos que se requieren para simulaciones tridimensionales probablemente no se encuentran disponibles durante un derrame. Algunos modelos también tienen la capacidad de calcular y de presentar las concentraciones de hidrocarburos debajo de la superficie del agua. Esta capacidad puede ser de interés en áreas con sensibilidades submarinas tales como la presencia del coral.

### TIPOS DE ENFOQUES.

Existen dos maneras de tratar el problema del transporte, el enfoque Euleriano y el Lagrangiano. En el primero se analizan las propiedades de un punto fijo, trabajando en la mayoría de los casos con la ecuación de Advección-Difusión [15], y en el segundo se describe el movimiento de una partícula dada en el espacio.

Con la primera opción, el empleo de la ecuación mencionada es apropiado para las sustancias pasivas en agua. Entre sus principales ventajas se encuentra la eliminación de la difusión numérica cuando se usa un esquema de alta resolución para resolver estas ecuaciones, además es perfectamente aplicable para mar abierto.

Los problemas esenciales vienen con la inclusión de una orografía compleja. Unido a ello se ha presenciado que con su uso y con el tratamiento numérico tradicional se alcanzan oscilaciones degeneradas que conducen a representaciones metafísicas del fenómeno de transporte.

La simulación de las manchas del hidrocarburo en zonas costeras, generalmente se realiza mediante técnicas lagrangianas [12]. En este caso la mancha de petróleo es modelada como una distribución de gotas independientes, las cuales se mueven en respuesta al cizallamiento (shear) de la corriente, la turbulencia y la flotabilidad. Esta aproximación usada para seguir el movimiento de las gotas del hidrocarburo ha sido utilizada en algunos modelos de derrames, aunque con distintas exactitudes en la formulación del shear de corriente [8] y otras simplemente no lo tienen en cuenta. La idea del trabajo

es el cálculo de los desplazamientos de cada partícula por medio de un sistema que trabaja con fenómenos como la advección y la difusión.

Para terminar con el cálculo de la concentración de petróleo en un punto dado, se procede a sumar las concentraciones de las partículas ( $C_p = C/\text{num. partículas}$ ) dentro del volumen de control en torno al punto que se desea y la suma correspondiente será el valor buscado. La concentración de cada partícula es la inicial estimada (de la mancha íntegra) entre el número concebido de partículas utilizadas para presentar el derrame [14].

### SALIDAS DE LOS MODELOS

Resulta interesante notar los detalles que brindan las figuras que a continuación se muestran. La figura 1 refleja un mapa resultado de la corrida del OILMAP y la figura 2 es la salida del programa de la universidad japonesa de Kyushu. Hay un exhaustivo análisis de los campos de viento, de las corrientes marinas y del transporte de la mancha de petróleo.

Es importante comentar la utilidad que presenta este tipo de modelación del medioambiente y el estudio de sucesos trascendentales [9]. Dentro de las informaciones ofrecidas al plan de contingencia ante accidentes de esta índole está el grado de afectación a la franja costera o a algún ecosistema específico y el tiempo para la afectación de la zona protegida. Otros datos interesantes que son muy útiles son el modo en que las condiciones meteorológicas influyen sobre el destino de la mancha, el número de recursos afectados (si se tienen concebidos los Mapas de Sensibilidad), la inclusión de técnicas de respuesta (barreras de contención, uso de dispersantes, quema insito, etc.).

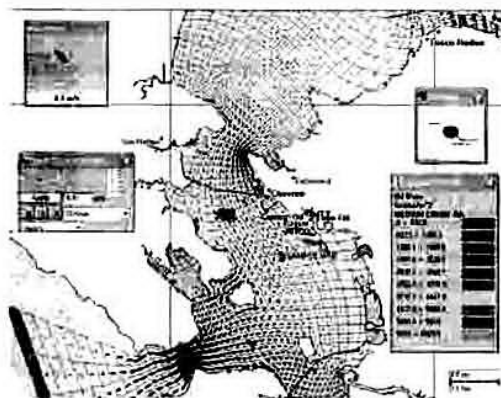


Fig. 1.- Simulación de la corriente marina y del transporte de la mancha en la Bahía de San Francisco realizado por OILMAP.

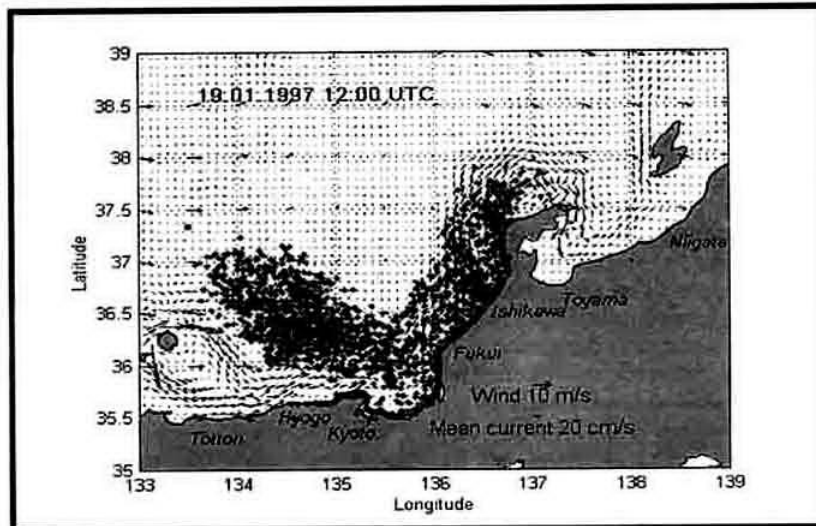


Fig. 2.- Simulación de los tres campos en el archipiélago japonés.

El Instituto de Meteorología de Cuba tiene la posibilidad de obtener la información de sus estaciones meteorológicas cada tres horas, además de disponer de herramientas útiles para determinar el campo de viento a mesoescala. De otro modo se reciben los datos sinópticos de varias estaciones de la región, buques de observación voluntaria y boyas ubicadas en el Golfo de México y el Atlántico, unido al empleo de modelos regionales.

Bajo estas condiciones decidimos trabajar con un modelo determinista para el pronóstico de la mancha de cualquier hidrocarburo en el mar. Los primeros escenarios analizados forman parte de nuestras zonas costeras fundamentalmente las principales bahías del país. La plataforma insular de Cuba tiene accidentes geográficos muy complejos y producto a ello es imprescindible garantizar la exactitud de cada etapa del modelo tal y como lo explicamos a continuación.

Con PHOENICS se obtuvieron resultados de estados importantes del campo de corrientes marinas para el día 5 de diciembre del 2003 (con viento de 5 m/s proveniente del NE y valores de marea debidamente insertados en la condiciones de fronteras). Estas salidas constituyen parte de la entrada de OILTRACK proporcionándole las condiciones de contorno con la calidad que requiere este último. De este modo se obtiene el campo continuo por más de 24 hrs. Con este procesamiento hidrodinámico se logra corroborar las características mencionadas por autores de instituciones cubanas [10, 11] y detallar los procesos dinámicos que se producen en la bahía. La figura 3 muestra resultados de la modelación en el instante  $t = 1:30$  hrs.

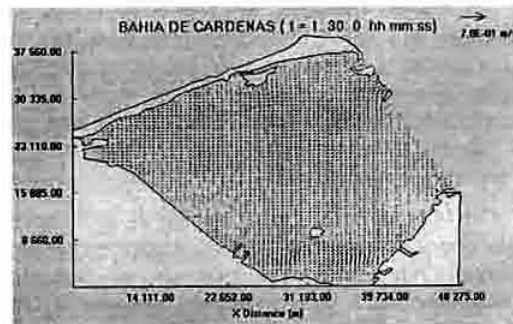


Fig. 3.- Resultado de la corrida del OILTRACK en un escenario de la Bahía de Cárdenas.

La modelación del derrame de hidrocarburo la realizamos también con este último software. Dentro de los procesos físicos tenidos en cuenta están la difusión, advección, dispersión y la interacción con la línea costera. En la figura 4 se observa la posición y estatus de la mancha en el tiempo  $h = 32$  hrs.



Fig. 4.- Accidente hipotético en la entrada de la Bahía de Cárdenas simulado por OILTRACK.

## Conclusiones

1. A lo largo de la historia se ha intentado calcular los procesos naturales ocurridos en las manchas de los hidrocarburos vertidos en el mar. Con el desarrollo de la técnica, la simulación del derrame ha evolucionado notablemente con tendencia a relacionar dichos procesos.

2. Los modelos deterministas pueden ser utilizados como una herramienta de evaluación de riesgos en la proyección del destino y trayectoria de derrames, considerando el impacto y las estrategias para atenuarlos. Pueden también asistir en decisiones como la ubicación de las boyas de carga, la posición de equipos de respuesta, etc.

3. Un método óptimo para describir la dinámica de las aguas en una zona costera es el hidrodinámico. Mediante él se logra obtener un conjunto de detalles espacio temporales útiles para mitigar impactos ambientales, proteger estuarios, etc.

4. La exactitud del modelo hidrodinámico será mayor mientras mejor se conciba la geografía de la zona de estudio, cuando el sistema de ecuaciones esté compuesto por los miembros más representativos en el lugar y cuando se utilicen elevados órdenes de exactitud en el procesamiento numérico.

5. Para proceder a escoger un determinado método o técnica numérica que responda de la manera más efectiva a un sistema de ecuaciones, es necesario realizar un balance entre la exactitud de los resultados, la potencia del procesador de cálculo disponible y el tiempo de respuesta deseado.

6. Con la combinación PHOENICS-OILTRACK se pueden obtener resultados de alta calidad, aun partiendo de una cantidad de datos limitada.

7. Nuestra propuesta de modelo tendrá en cuenta la advección, la difusión, la dispersión y la interacción con la línea de la costa.

8. El enfoque Lagrangiano es el ideal para describir fenómenos de derrames en zonas costeras.

## Referencias Bibliográficas.

**Bishop, Joseph M. (1984):** «Ocean Engineering: A Wiley Series»; 251 pp.

**Calzada Estrada, A. (2002):** «Difusión de Petróleo en Aguas Cercanas a Objetivos Económicos»; Tesis en opción al grado de Master.

**Calzada Estrada, A. y Marín-Antuña, J. (2002):** «Metodología Para el Tratamiento de la Modelación de Derrames de Petróleo en el Mar», 1er Seminario Taller «La Física en la Meteorología»; 22 pp.

**Calzada Estrada, A., Mut Benítez, R., Marín Antuña, J. M., Alberteris Campos, M. (2003):** «Cálculo del Campo de Velocidades de las Corrientes Marinas en la Bahía de Cárdenas»; Revista Cubana de Meteorología; Vol. 10; número 1; 39-47 pp.

**Costal Meteoservice (1993):** «Comportamiento de las variables Oceanográficas y Meteorológicas en la Bahía de Cárdenas y sus Alrededores»; Reporte No. 064; 54 pp.

**CHAM (1987):** POLIS (programa de autoinstrucción de PHOENICS versión 1.4).

**Chang, W.L. (1994):** «Oil Spill Modelling», Marine Meteorology and Related Oceanographic Activities, Report No. 31, 247-248 pp.

**Daniel, Pierre (1996):** «Operational Forecasting of Oil Spill Drift at Meteo-France», Spill Science and Technology Bulletin; Vol. 3; No. ½; 53-64 pp.

**Daniel, Pierre; Josse, Patrick and Dandin Philippe (2001):** «Forecasting the Erika Oil Spills»; 2001 International Oil Spill Conference; 649-655 pp.

**García Díaz, C. (1996):** Informe de Oceanografía: «Zona W de la plataforma Norcentral (Bahías de Cárdenas y Santa Clara W)»; Centro de Investigaciones Pesqueras.

**García Galocha, René (1992):** «Dinámica de las Aguas de la Bahía de Cárdenas»; Revista del Instituto de Investigaciones del Transporte; 18-20 pp.

**García Martínez, Reinaldo y Flores-Tovar, Henry (1999):** «Computer Modeling of Oil Spill Trajectory With a High Accuracy Method»; Spill Science and Technology Bulletin. Vol. 5, 323-330 pp.

**Instituto Cubano de Hidrografía:** Derrotero de las costas de Cuba; Poligráfico de Guantánamo, Cuba; Tomo II; 379 pp.

**Ramos, S.; Delgado, L.; García-Martínez, R. and Rodríguez R. (1999):** «POSA – An Integrated Oil Spill Simulation Model-GIS for the Elaboration of a Contingency Plan in the Gulf of Paria, Estado Sucre, Venezuela»; 4th International Congress on Energy, Environment and Technological Innovation. Roma, Italia; 711-716 pp.

**Reddy, G.S. and Brunet, Marc:** «Numerical Prediction of Oil Slick Movement in Gabes Estuary»; Transoft International, EPINAY/SEINE, Cedex, France.

**Salas de León, David A. (1987):** Modelo Numérico para la predicción del transporte y la dispersión de petróleo en el océano; Proceeding; Jornada de Estudio en Oceanología; CONACYT, México; 161-176 pp.



**West, Mark y Solsberg, Laurie (1998): Modelado de trayectorias de derrames de hidrocarburos; Informe Ambiental ARPEL No. 4; 46 pp.**

*Abstract*

*This article deals with a high-priority theme for all the countries located around the Caribbean and Gulf of Mexico: the accidents by oil spill on the sea. It is introduced with a briefing about the situation of the coast around and the danger announcement of a possible affectation. A summary is obtained as a first result, that present the physical processes occurred in the oil slick. The same way, details of how each of them has been modeled since the first attempts until current days are provided. It is shown an interesting relation of software available and its main characteristics as a sample of technology and computing media evolution in the simulation.*

*Together with the offered historic panorama, the results achieve by the Department of Marine Meteorology at the Meteorology Institute. PHOENICS is applied in scenarios of the Cuban insular platform with excellent results. Wind data and marine currents at specific points of the area have been used to feed the software after a previous study of both series. Lastly, OILTRACK is coupled to obtain the final field of marine currents in the course of time, and it is performed the simulation of a hypothetical spill in the entrance of Cárdenas Bay. At the end of this work, main findings and conclusions are stated to allow specialist who are interested in this subject getting the important details for their own studies.*

**Key words:** oil track modeling