

# Contaminación por hidrocarburos en la costa noroccidental de Cuba (Boca de Jaruco) basada en simulaciones numéricas

Oil pollution in the northwest coast of Cuba (Boca de Jaruco) based numerical simulations

**Dra. Alina Rita Gutiérrez Delgado** | [alina@oceano.inf.cu](mailto:alina@oceano.inf.cu) | Instituto de Oceanología

**Lic. Amaury Álvarez Cruz** | [amaurya@ama.cu](mailto:amaurya@ama.cu) | Instituto de Oceanología

Recibido: diciembre 9, 2013; aceptado: junio 20, 2014.

## Resumen

La zona costera de Boca de Jaruco se localiza en la región noroccidental de Cuba. En este sector costero está enclavada la planta de gas Energas, en cuyos alrededores la actividad fundamental es la extracción de combustibles fósiles; por ello, se realizó un estudio de las probabilidades de contaminación de esa planta, basado en los modelos lagrangianos Oilmap, Gnome y Tari. Se utiliza información (oceanográfica y meteorológica) *in situ* y modelos de circulación oceánica. Los resultados numéricos fundamentan que la planta Energas, dada su posición geográfica, el sistema de corrientes imperante y las actividades de explotación en sus alrededores, tiene el peligro de contaminación por derrames de hidrocarburos. De igual manera, los cayos de la Florida poseen una alta probabilidad de contaminación.

**PALABRAS CLAVE:** Simulación numérica, contaminación, hidrocarburos, corrientes marinas.

## Abstract

The coastal area of Jaruco Boca is located in the northwestern region of Cuba. In this coastal area, gas plant Energas is located, and around it, the main activity is the extraction of fossil fuels. For this reason, a study of the potential for contamination of the gas plant, based on lagrangian models Oilmap, Gnome and Tari was performed. Oceanographic and meteorological *in situ* information, and ocean circulation models are used.

Numerical results support that Energas gas plant, given its geographical position, the system prevailing currents and the exploitation activities around this, has the contamination danger by oil spills. Similarly, the Florida Keys have a high probability of contamination.

**KEYWORDS:** Numerical simulation, contamination, hydrocarbons, marine currents.

## Introducción

Los estudios de contaminación por hidrocarburos y de seguimiento de contaminantes han tomado mayor auge en las últimas dos décadas (Delvigne *et al.*, 1988; Reed *et al.*, 1989; Spaulding *et al.*, 1994; Spaulding *et al.*, 1996; IPIECA, 1995,1997). En Cuba, estos estudios se priorizan en zonas vulnerables a este tipo de contaminación (Calzada *et al.*, 2009; Gutiérrez (2003,2003a, 2004, 2005; Viamontes, 2005; Bermúdez *et al.*, 2012), por lo que el presente trabajo examina el peligro de contaminación por hidrocarburos de la zona costera de Boca de Jaruco, localizada en la región noroccidental de Cuba, donde predomina la actividad petrolera. En el sector de Boca de Jaruco se halla la planta de gas Energas, construida para recuperar el gas quemado en las operaciones de extracción de petróleo. El proyecto de la planta involucró la modernización de las turbinas de gas existentes con generadores de vapor de ciclo abierto (OTSG, por sus

siglas en inglés). Los OTSG utilizan agua salobre en el sitio de la planta o cerca en sus cercanías; las entradas de agua salobre y las descargas al mar desde la planta son vulnerables a la contaminación por hidrocarburos dada la cercanía a la explotación del mineral en tierra y en la *zona económica exclusiva* (ZEE) de Cuba en el Golfo de México.

El estudio numérico para determinar el peligro de contaminación de la planta es probabilístico porque, en general, los derrames de hidrocarburos dependen de factores que se determinan con cierta exactitud, por ejemplo, las corrientes marinas y el viento. En este caso, las condiciones oceanográficas y atmosféricas habituales de la región noroccidental de Cuba, modificadas por eventos meteorológicos (frentes fríos, huracanes y bajas extratropicales), serían los agentes causantes del transporte de contaminantes en el mar. Además, la corriente de la Florida desempeña un papel determinante en la transportación del contaminante hacia Boca de Jaruco; esta corriente tiene períodos del año en que se acerca a la costa cubana (Gutiérrez A. *et al.*, 1996), por lo que las partículas de hidrocarburos llegarían rápidamente a la región donde está enclavada la planta Energas. Cuando esta corriente se aleja escasos kilómetros de la costa cubana, arrastra casi todo el contaminante hacia la península de la Florida.

Otros aspectos que deben tenerse en cuenta al analizar el transporte del hidrocarburo son las condiciones de turbulencia. El estudio de los patrones de turbulencia en la región identifica la aparición de cuantiosos vórtices de mesoescala que favorecen la retención del contaminante (Gutiérrez y Álvarez, 2008, 2012a). Además, la difusión de un contaminante está dominada por el tipo de hidrocarburo y el coeficiente de difusión asociado a la velocidad de las corrientes marinas (Kirstein, B., Clayton, J. R., Clary, C., Payne, J. R., McNabb, D., Fauna, G. y Redding, R., 1985). Todos estos posibles efectos se estudian en esta investigación, para lo cual se utilizan varios *softwares* que simulan el proceso de transporte estocástico

teniendo en cuenta, tanto la advección, como la difusión del contaminante. Los modelos lagrangianos trabajan con informaciones meteorológica y oceanográfica provenientes de modelos de circulación global, satélites altimétricos y datos del Instituto de Meteorología de Cuba (González, 1999).

Las incertidumbres asociadas al estudio consisten en que las informaciones climáticas y oceanográficas son dadas a una escala suficiente para estimar el peligro, pero no son adecuadas para describir los detalles. La ocurrencia de los derrames puede afectar una región bastante amplia, en la cual se halla la planta Energas en Boca de Jaruco; por ello, ante un evento de tal naturaleza, los medios y medidas de contingencia deberán planificarse.

El objetivo principal de la investigación es determinar el peligro de contaminación en la toma y la descarga de la planta Energas por los posibles derrames de hidrocarburos provenientes de los pozos en tierra u ocurridos costa afuera, accidentes tecnológicos y(o) la limpieza de las sentinas de los buques.

Para cumplimentar el objetivo principal, bajo condiciones climáticas características y los efectos de condiciones extremas (huracanes y frentes fríos), se requiere cumplir los objetivos específicos siguientes:

1. Modelar un derrame costa afuera, en la ZEE de Cuba.
2. Modelar un derrame en las instalaciones de tierra de Cupet cercanas al canal de entrada del sistema de enfriamiento.
3. Modelar un derrame proveniente del lavado de las sentinas de los buques que navegan en la ZEE.

Los principales resultados numéricos del estudio indican que los derrames producidos en la región *offshore* (al norte de La Habana y en la ZEE de Cuba en el Golfo de México) en condiciones climatológicas habituales, ofrecen mayor peligro de contaminación para la península de la Florida, mientras que existe una menor probabilidad de contaminación para la planta Ener-

gas. Los derrames que se producen bajo condiciones de huracán acrecientan la probabilidad de contaminación de la planta y las costas cubanas aledañas. Los derrames en tierra (cerca de la planta) en condiciones climatológicas características, contaminan la planta, a la vez que pueden contaminar los cayos de la Florida. Las limpiezas de sentinas efectuadas cerca de Cuba bajo condiciones climatológicas habituales, pueden contaminar la costa cubana, aunque el mayor peligro de contaminación lo tiene la península de la Florida.

## Materiales y métodos

REGIÓN DE ESTUDIO: Está limitada a Boca de Jaruco, en la costa noroccidental de Cuba y la ZEE de Cuba en el Golfo de México, actualmente bajo explotación petrolera (Fig. 2.1).

### Información empleada en el estudio

#### Batimetría

El modelo digital proviene de la batimetría de Gebco <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/gebco/> a una resolución de 900 m (Figura 2.1).

#### Circulación oceánica (corrientes)

La información de circulación oceánica proviene de varias fuentes que comprenden el período entre 1993 y 2013.

1. Corrientes geostróficas calculadas a partir de mediciones de temperatura y salinidad en la ZEE de Cuba en el Golfo de México (Gutiérrez A., 2013).
2. Series de corrientes entre 1996 y 2000 aportadas por el satélite ERS1/2.
3. Series de corrientes marinas simuladas con el Modelo Global de Circulación General y Climatología Avanzada (OCCAM). El modelo OCCAM (<http://www.aoml.noaa.gov>) asimila datos de la anomalía de la altura del nivel del mar derivados de los altímetros Jason-1, Topex, ERS 1/2 y Envisat. El algoritmo usado por este modelo elimina los errores de la altura superficial del mar en las regiones separadas por corrientes fronterizas utilizando las alturas dinámicas climatológicas basadas en la climatología de Levitus. Asimismo, conserva las propiedades del agua de mar, las cuales no son observadas por altimetría (Fox, Haines, De Cuevas, y Webb, 2000).

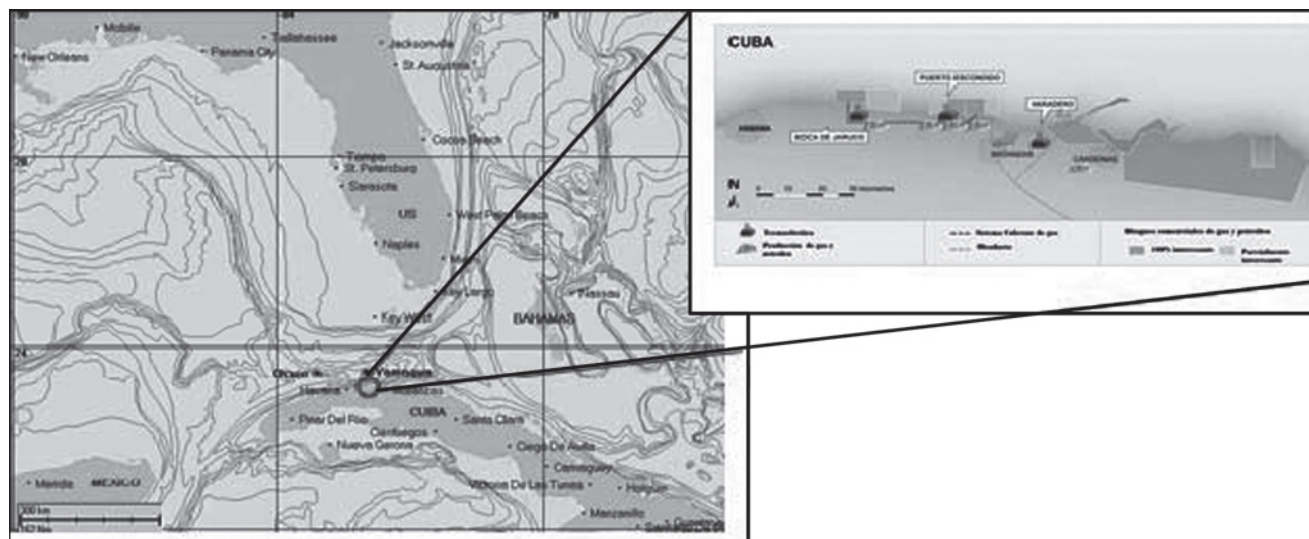


Fig. 2.1 Ubicación geográfica de la región de estudio: Boca de Jaruco, Santa Cruz del Norte. Batimetría regional según GEBCO <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/gebco/>. A: Localización de la planta energética Energas, las instalaciones productoras de petróleo y los pozos Ocuje y Yamagua. Modificado del proyecto de ciclo combinado Energas Boca de Jaruco (2010).

Además de las fuentes anteriores se utiliza el campo de circulación oceánica de la región occidental cubana aportado por los modelos globales de corrientes oceánicas siguientes: Hybrid Coordinates Model (HYCOM), Real-Time Ocean Forecast System (RTOFS), Princeton Ocean Model (POM) y Parallel Ocean Program (POP).

La circulación oceánica de los modelos HYCOM, RTOFS y corrientes geostróficas de CoastWatch se localizan en GOOS (*Gnome Online Oceanographic Data Server*) en formato *Netcdf* para el modelo Gnome (*General NOAA Oil Modeling Environment*).

#### **Datos de circulación atmosférica (vientos)**

La información del campo de viento durante el huracán Irene (categoría 5) se obtiene del modelo atmosférico GFS (*Global System*) a la altura de 10 m; los datos aparecen en el formato binario GRIB2 en el sitio <https://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves>; los resultados numéricos de los modelos atmosféricos son producidos por el Centro Nacional de Predicciones Ambientales (NCEP, siglas en inglés) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA); y la información característica del viento o régimen habitual del viento es proporcionada por el Instituto de Meteorología de Cuba.

#### **Tipo de hidrocarburo simulado**

En las simulaciones se utilizó el crudo Maya como contaminante virtual; este crudo extraído en el Golfo de México es semejante al extraído en la región cubana de Santa Cruz. La caracterización del crudo Maya se ha obtenido del programa ADIOS (*Oil Spill Weathering Model*) (NOAA, 1995) y como particulares del diésel se han utilizado las del diésel Southern USA 1997, dado que se trata de los estándares utilizados en los estudios de hidrocarburos realizados por ASA (*Applied Science Associates*) (ASA, 1997). La tabla 2.1 muestra las características de los hidrocarburos utilizados en las simulaciones de los vertidos.

TABLA 2.1

*Características de los hidrocarburos utilizados en la simulación*

Tipo de hidrocarburo	Crudo tipo Maya	Diésel
API	21.30	39.19
Viscosidad (cp)	140.267	4
Tensión superficial (din/cm)	27	26.9
Contenido de agua máx. (%)	74	0
Relación gas/crudo	89.9 a 1	-

El contenido de agua máximo del crudo Maya es de 74 %; este indicador se utiliza para valorar la tendencia a formar emulsión de un hidrocarburo, la cual le confiere al crudo una mayor resistencia a su disolución en el agua y, por tanto, en caso de vertido en el océano, favorece que el crudo se mantenga en el agua mayor tiempo. La viscosidad y la tensión superficial del crudo son parámetros que determinan la capacidad del crudo para extenderse sobre la superficie oceánica; a mayor viscosidad y tensión superficial, menor superficie de ocupación. La capacidad de extensión afecta a la vez la tasa de evaporación, disolución, dispersión y foto-oxidación, por lo cual ciertos cambios en la viscosidad y la tensión superficial también afectarían estos parámetros. El diésel es un producto refinado con una composición relativamente homogénea; por consiguiente, se evapora con mayor rapidez que el crudo Maya.

La perforación realizada por Sherrit en el prospecto de 20 km<sup>2</sup> en Santa Cruz, situado a 2.5 km de la costa, al este de La Habana, se conoció como el pozo exploratorio *Santa Cruz 100*, el cual es un petróleo crudo de 18 grados API (más ligero que el crudo Varadero o Yumurí), con muy poca agua, una buena presión de producción y un contenido de azufre inferior a 5 %. Se considera que el crudo Santa Cruz es similar a la mezcla mexicana de crudo Maya, aunque se evapora en el agua más rápido que este último y en menor medida que el diésel.

#### **Características hidrodinámicas de la región**

Al norte de Boca de Jaruco, el patrón de circulación sugiere una corriente, principalmente, al este for-

mando parte de la corriente de la Florida (Gutiérrez A., 2003, 2004, 2005), en cuyo tramo, la corriente puede intensificarse hasta 200 cm/s como respuesta al acercamiento de la corriente de la Florida a la plataforma cubana. En los niveles más profundos permanece el patrón de circulación descrito y la corriente se mantiene intensa hasta más de 150 m de profundidad (Gutiérrez A., 2009). Algunos estudios oceanográficos de GEOCUBA Estudios Marinos, basados en mediciones con una sonda oceanográfica (Viamontes, 2005), mostraron que un día después del paso del huracán Katrina, en 2005 (Oey, L.Y. & Wang, D. P., 2009), la columna de agua respondía a corrientes de dirección este, con intensas velocidades de más de 200 cm/s en la superficie y de 125 cm/s, 150 cm/s y 190 cm/s en los niveles de 20 m, 30 m y 50 m, respectivamente, sobre todo en el eje de la corriente de la Florida y en el giro anticiclónico al noroeste de Pinar del Río (Fig. 2.2).

De manera particular, la región noroccidental cubana se caracteriza por la presencia casi permanente

de remolinos oceánicos (Gutiérrez A., Pérez J., Barbeito R., y Moreau P., 1997,1998, 1999) que le confieren a las partículas un tiempo de residencia mayor en la región, al dejarlas atrapadas entre la costa cubana y la intensa corriente de la Florida; las partículas que no alcanzan la corriente de la Florida permanecen cerca de la costa cubana e incrementan el peligro de contaminación costera (Gutiérrez, 2013). Estos remolinos atrapan las partículas de hidrocarburos, pero también las desplazan y, por ende, transportan el contaminante (Fig. 2.3).

### CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS

El campo de viento es determinante en los estudios de seguimiento de las trayectorias de contaminantes. La región estudiada se caracteriza por vientos de los cuadrantes I y II durante el verano, y de los cuadrantes I y IV en el invierno. Los vientos que soplan en la región noroccidental cubana son afectados, principalmente, por la entrada de los “nortes” durante la temporada de invierno (Soltura, Mon, Ro-

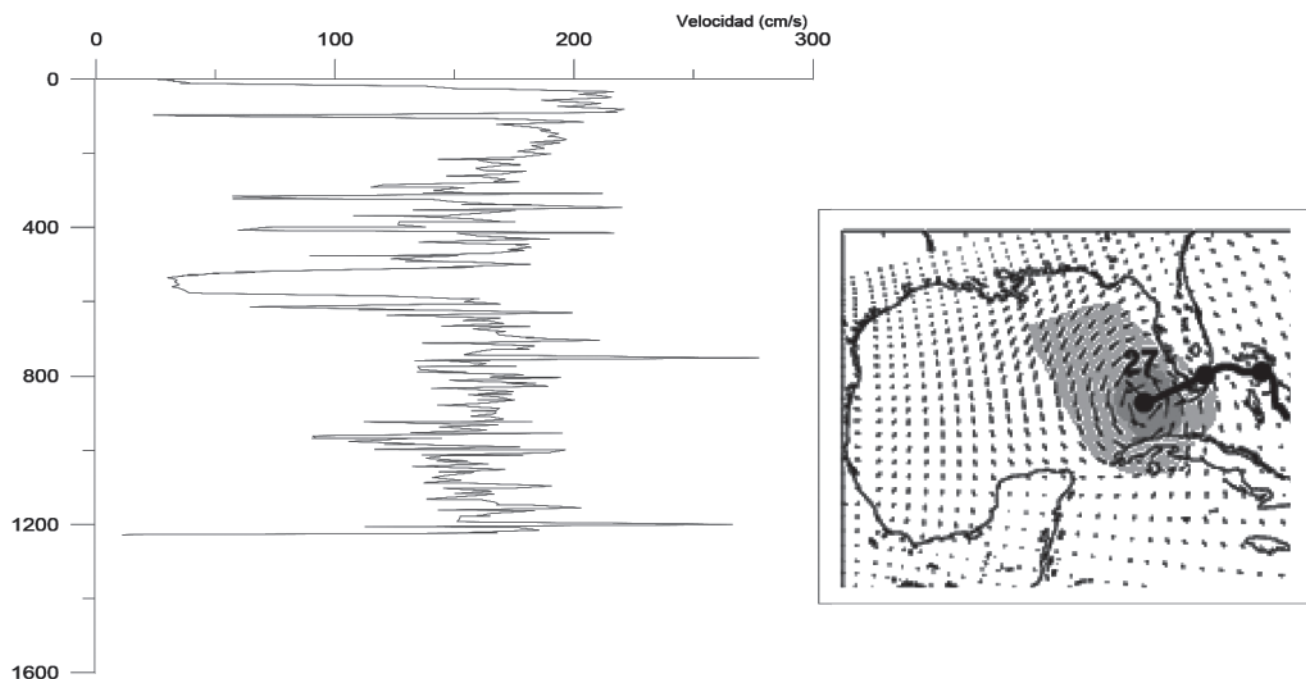


Fig. 2.2 Estructura vertical de la velocidad de la corriente medida in situ (al norte de La Habana), el 29 de agosto de 2005, después del paso del huracán Katrina. Se observa el aumento de la intensidad de la corriente hasta 1 200 m de profundidad.



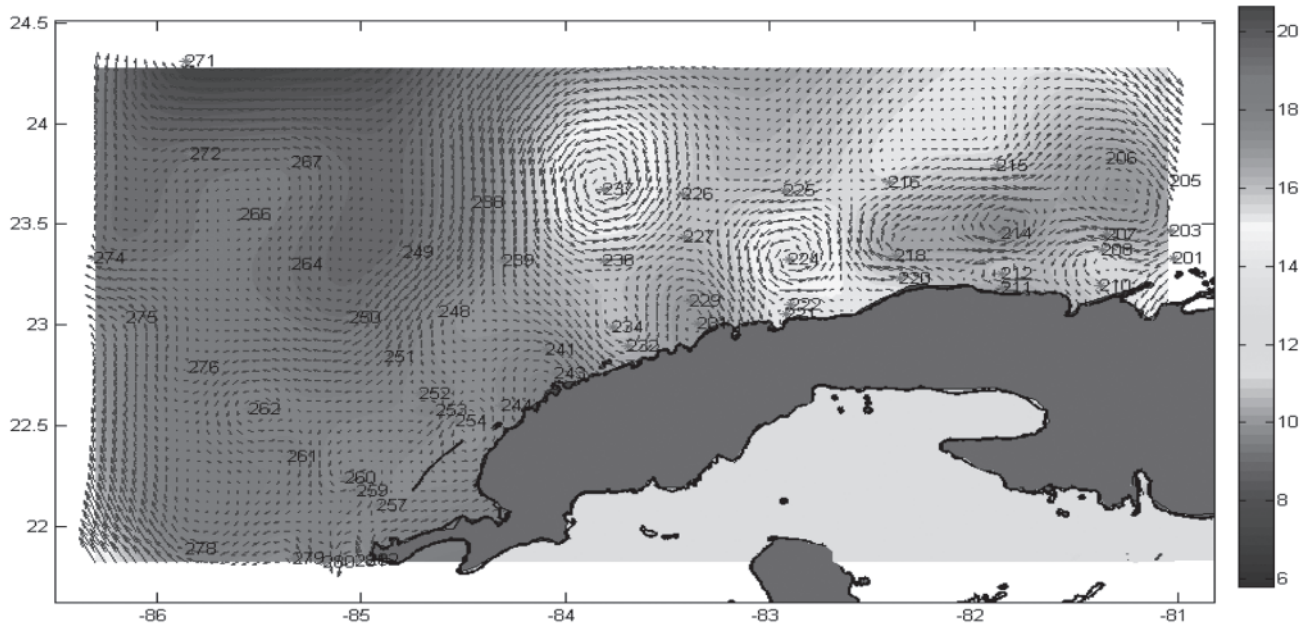


Fig. 2.3 Distribución horizontal de las alturas dinámicas y los vectores corrientes en la región noroccidental de Cuba. Crucero de septiembre a noviembre de 1991 (Gutiérrez, 2013).

dríguez, Báez, y Ayala, 1995). Además, los huracanes y frentes fríos (González, 1999) introducen modificaciones al patrón de circulación de las corrientes marinas y el viento.

### Tareas fundamentales

1. Utilización de las corrientes marinas en las condiciones siguientes:
  - a. Habituales (se toman los parámetros oceanográficos físicos característicos del verano y el invierno).
  - b. Extremas (huracanes o frentes fríos).
2. Simulación numérica de la transportación del derrame utilizando tres modelos matemáticos de descripción lagrangiana.

### Softwares utilizados

GNOME: Es un modelo de trayectorias de hidrocarburos de carácter público que simula el movimiento de los hidrocarburos dadas las condiciones de viento, corrientes, marea y dispersión. Fue desarrollado por la división de respuesta a materiales peligrosos (HAZMAT, siglas en inglés), perteneciente a la Natio-

nal Oceanic and Atmospheric Administration Office of Response and Restoration (NOAA OR&R).

OILMAP: Este paquete incluye el modelo para la trayectoria y el destino de los hidrocarburos superficial y subsuperficial (Jayko & Howlett, 1992); lo utilizó CESIGMA (2004) en los estudios del impacto ambiental de los pozos a prueba Ocuje y Yamagua, situados al norte de la planta Energas. Este modelo para la trayectoria y el destino del hidrocarburo predice el transporte y la degradación del hidrocarburo, tanto en los vertidos instantáneos, como los continuos. Las predicciones muestran la localización y la concentración de los hidrocarburos flotante, disuelto y subsuperficial en el tiempo.

TARI 3.0: Es un modelo lagrangiano creado para el seguimiento de trayectorias, parametrizado en dependencia de la sustancia que se quiera simular. Este código numérico fue utilizado con anterioridad en la determinación de los lugares desde donde arriban las larvas de langosta que recalán en la península de Yucatán (Comunicación personal del doctor Julio Candelá, CICESE, México, 2006), en un proyecto de inves-

tigación para el seguimiento de larvas de langosta en el Caribe y en publicación (Gutiérrez, Álvarez, Frías y Alfonso, 2009, Gutiérrez A., Baisre J., Álvarez, A. (2012b); además, se utilizó en una tesis de doctorado y en los estudios de contaminación por hidrocarburos en la bahía de Mariel (Álvarez A., 2012). El código fuente está hecho sobre Matlab y, al ser un código abierto, permite la modificación de los parámetros.

### **Características de la descripción lagrangiana utilizada en tari 3.0**

Las trayectorias de las partículas son calculadas integrando la ecuación de Langevin (Sawford, 2001). Para calcular la posición de la partícula después de un tiempo se utiliza el método Runge-Kutta de segundo orden (Roman, 2005); para calcular la velocidad en los puntos de la trayectoria de la partícula se recurre a la interpolación bilinear de la velocidad euleriana con el método inverso de la distancia. La generación de registros de velocidades aleatorias ( $u_d$ ,  $v_d$ ) se obtiene con el método de Monte Carlo, sujeto a ciertas restricciones estadísticas (Watson, 1992). La forma de generar un ruido aleatorio es mediante los procesos estocásticos de Ornstein-Uhlenbeck (Gardiner, 1983); para el cálculo del ruido se utiliza el tiempo lagrangiano integral (TLI). Centurioni y Niller (2003) calcularon que el TLI es de cinco a seis días en el Mar Caribe; estos valores son usados de inicio en las simulaciones numéricas y, posteriormente, se utilizan las estimaciones de ocho días, más apropiadas para las aguas cubanas.

## **Resultados**

### **Sección I**

Modelación del proceso de transporte y arribo de hidrocarburos a la obra de toma y descarga de la planta de gas de Boca de Jaruco, provenientes de un derrame costa afuera, en la zona económica exclusiva (ZEE) de la región noroccidental de Cuba

La ZEE de Cuba en el Golfo de México se encuentra en explotación por diferentes compañías petroleras extranjeras, lo que constituye un peligro potencial de contaminación en la región de interés. Este tipo de escenario será simulado numéricamente para diferentes casos de derrames liberados en la región *offshore* que obedecen, tanto a la situación climatológica imperante, como a la hidrodinámica de la región. Entre los lugares de derrames virtuales en la región *offshore* se planificaron los sitios de los pozos Ocuje y Yamagua (Fig. 2.1).

### **Escenario de un derrame costa afuera en condiciones climáticas habituales**

Para cumplimentar este objetivo se consultaron los resultados de la simulación del afloramiento del crudo de pozos oceánicos con el modelo estocástico Oilmap (CESIGMA, 2004).

Con el modelo Oilmap se realizaron simulaciones de vertido con los datos climáticos de 1993 a 1998; los períodos de estudio se limitaron al régimen habitual de los meses de abril a mayo (ventana climática favorable para las prospecciones). En aras de identificar la trayectoria más probable desde los diferentes puntos de vertido, el modelo realiza múltiples simulaciones con vientos y corrientes marinas registrados en diferentes momentos y años (CESIGMA, 2004); en estas simulaciones se demuestra que el vertimiento de los pozos Ocuje y Yamagua, con las condiciones impuestas, puede arribar a la costa cubana y contaminar las tomas de carga y descarga de la planta de gas de Boca de Jaruco. En el escenario crítico, considerando el tiempo mínimo de arribo del derrame a la costa cubana, se constata que en las primeras 24 h el contaminante se halla en la costa o muy cerca de esta.

Los pronósticos muestran que el contaminante afecta la porción noroccidental de Cuba, donde se localiza la planta Energas. Un vertimiento de crudo del pozo Ocuje podría contaminar la costa cubana con una probabilidad de 10 %, mientras que la Flo-

rida tiene una probabilidad mayor de contaminación (hasta 40 %). Para el caso de un vertimiento del pozo Yamagua, la costa cubana (región de Jaruco) presenta 30 % de probabilidad de contaminarse, mientras que la Florida tendría una probabilidad menor (20 %) de afectación (CESIGMA, 2004). Independientemente de las probabilidades de afectación que arroja este modelo, deben tomarse todas las medidas de precaución por el peligro de contaminación que tiene la planta.

### Escenario de derrames costa afuera durante un evento extremo

El huracán Irene de la temporada de 1999 se utiliza para ejemplificar la simulación de las trayectorias de un derrame que se produce costa afuera bajo condiciones extremas (Fig. 3.1). Esta tormenta tropical, que se desarrolló entre el 12 y el 19 de octubre, alcanzó vientos máximos de 148 km/h y una presión mínima de 968 mbar; al abandonar el territorio cubano, muy cerca de Boca de Jaruco, disminuyó la intensidad de sus vientos a 111km/h y la presión aumentó a 988 mbar.

### Características de la simulación

La simulación de las trayectorias de partículas se realiza con el modelo Tari 3.0 en ambiente Matlab 12.0. El derrame virtual del crudo se produce en 50 puntos,



Fig. 3.1 Trayectoria de la tormenta tropical Irene (temporada ciclónica de 1999).

y es equivalente a la liberación de 17 500 partículas agrupadas en nueve localidades de la región *offshore* que pertenecen a bloques de exploración y explotación petroleras (Fig. 3.2). Todos los puntos escogidos se localizan en aguas profundas —entre estas localidades se hallan los pozos de Ocuje y Yamagua—; la selección de estos puntos se realiza con el objetivo de contar con una mayor representatividad de las posibles trayectorias de los derrames virtuales liberados en la región *offshore* de Pinar del Río, en la ZEE de Cuba en el Golfo de México y las localidades cercanas a la Florida y la isla de Cuba.

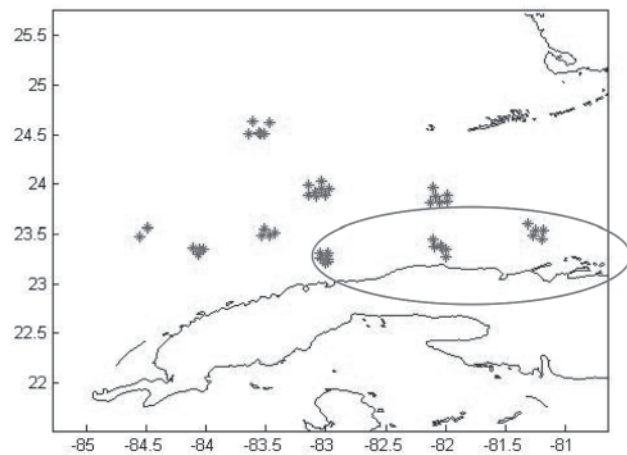


Fig. 3.2 Ubicación geográfica de los derrames virtuales en aguas oceánicas. Se señalan los grupos de partículas más cercanos a Cuba.

1. El derrame se produce durante el huracán Irene de 1999. El tiempo máximo de las partículas en el agua es de un mes; pasado este tiempo, se cuantifica en porcentajes los lugares del arribo de las partículas, ubicándolas en polígonos previamente establecidos. Asimismo, la cantidad del hidrocarburo que arriba a las costas se ofrece en porcentajes, según la cantidad total del derrame.
2. El campo de corrientes marinas proviene de la asimilación de los satélites ERS 1/2 durante septiembre a noviembre de 1999, y cambia cada cinco días. Resolución-16 km.



3. El ruido Ornstein-Uhlenbeck se utiliza para simular la dispersión (Provenzale, Babiano y Zanella, 1998).

### Trayectorias de derrames en regiones offshore

Las figuras 3.3a, b y 3.4 muestran 17 500 trayectorias de partículas virtuales liberadas en la región *offshore* bajo los efectos del huracán Irene. Las trayectorias de las partículas liberadas el 29 de septiembre de 1999 mostraron que los derrames virtuales siguieron, preferentemente, la corriente de la Florida. En la región noroccidental de Cuba se observaron remolinos de mesoescala que mantuvieron concentrada una parte de las partículas durante el mes simulado; además, una parte considerable de los derrames cercanos a Cuba arribaron a las costas de Boca de Jaruco, mientras que otra entró en los canales de San Nicolás y Viejo de Bahamas cuando las partículas se liberaron el 29 de septiembre. Esta particularidad alerta sobre la posible contaminación del archipiélago Sabana-Camagüey por derrames producidos en la región noroccidental de Cuba (ver Fig. 3.3a y b).

De manera general, los derrames ocurridos en la región *offshore* bajo condiciones extremas fueron trasladados hacia la Florida por la fuerte corriente de la Florida; una parte de las partículas se mantuvo concentrada en remolinos y alcanzó la región costera. En el período simulado, los derrames virtuales ocurridos en los pozos de Ocuje y Yamagua tuvieron una mayor probabilidad de contaminar la zona costera de Boca de Jaruco.

Bajo las condiciones de estas simulaciones, la península de la Florida posee un mayor peligro de contaminación; esta puede ser afectada con 65 % del hidrocarburo liberado en la región *offshore*. En la figura 3.4 se observa que los cayos y la costa sur de esta península se afectaron con 2 % del total liberado, mientras que a la costa este de la península arribó 63 % del total liberado y la región noroccidental de Cuba se contaminó con 26 % del hidrocarburo liberado. Este resultado, aunque muestra que la costa cubana tiene una

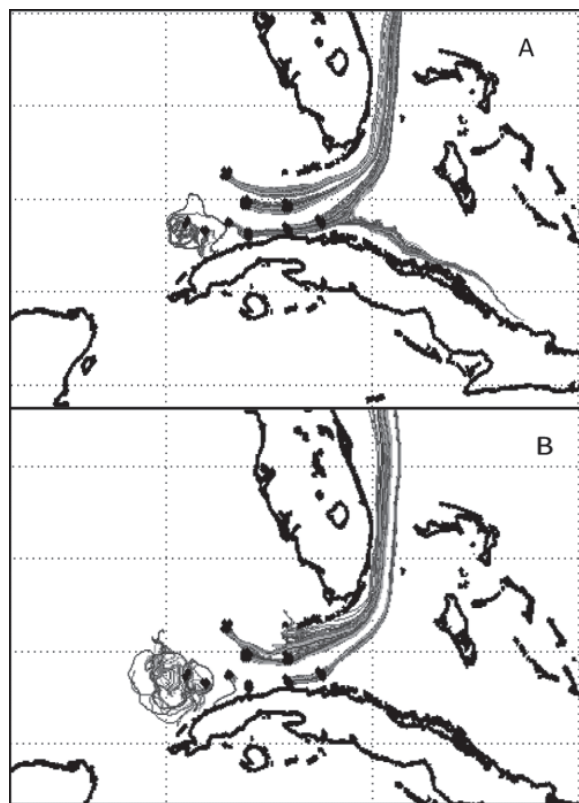


Fig. 3.3 Modelo Tari 3.0. a) salida del derrame el 29 de septiembre de 1999, el fin de la trayectoria el 29 de octubre de 1999; b) salida del derrame el 9 de octubre de 1999, el fin de la trayectoria del derrame el 8 de noviembre de 1999.

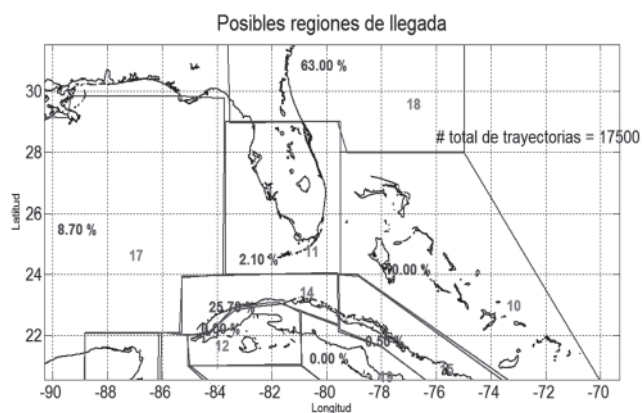


Fig. 3.4 Modelo Tari 3.0. Distribución de los porcentajes de trayectorias que arriban a polígonos ubicados en el Caribe después de transcurrido un mes. A la costa este de la península de la Florida arriba 63 % del total liberado; a la región noroeste de Cuba arriba 26 %; al Golfo de México arriba 8 %; la costa sur de la península de la Florida y los cayos adyacentes se contaminan con 2 %, y los canales de San Nicolás y Viejo de Bahamas, con 0.5 % del total liberado.



La simulación realizada con el modelo Gnome, consistente en la liberación de un derrame de 1 000 barriles de crudo medio desde tierra, muestra que la totalidad del derrame permanece cercano a la costa después de dos días; la liberación virtual de 1 000 barriles finaliza con 621 barriles de crudo que permanecen flotando, mientras que 294 barriles se evaporan o dispersan y a la costa arriban 85 barriles, que representan 8.5 % del derrame total.

Bajo las condiciones anteriores, variando el campo de circulación entre el 11 y el 20 de agosto de 2013 con el modelo HYCOM (Fig. 3.7) a una resolución de 8 km, se obtienen características similares; el derrame permanece cerca de la zona costera aledaña a Boca de Jaruco, y del total liberado se evaporan o dispersan 395 barriles, flotan 527 barriles y alcanzan la costa 78 barriles (Fig. 3.8).

Manteniendo iguales condiciones y utilizando el campo de corrientes proveniente del cálculo geostrófico (AOML/ NOAA CoastWatch) entre el 23 y el 30 de octubre, se observa que, de la liberación de 1 000 barriles de crudo medio desde Boca de Jaruco, gran parte del derrame es arrastrado por la corriente de la Florida. En esta simulación, transcurridos seis días, el grueso de la mancha se encuentra a la altura de 25° 18' N y 79° 30' W; al concluir la simulación, flotan 470 barriles entre Boca de Jaruco y Cayo Sal, se retienen 95 barriles y se evaporan o dispersan 435 barriles del total liberado (Fig. 3.9).

Las simulaciones numéricas realizadas con el modelo Gnome bajo condiciones climáticas habituales y con la inclusión del campo de corrientes proveniente de tres modelos de circulación oceánica, mostraron un comportamiento similar del hidrocarburo después que las partículas son liberadas desde tierra; los resultados corroboran que en los períodos simulados de agosto y octubre de 2013 se queda en la costa cubana entre 8 % y 10 % del total liberado, flota entre 47 % y 62 % del hidrocarburo, y se evapora entre 29 % y 43 % de 1 000 barriles liberados.

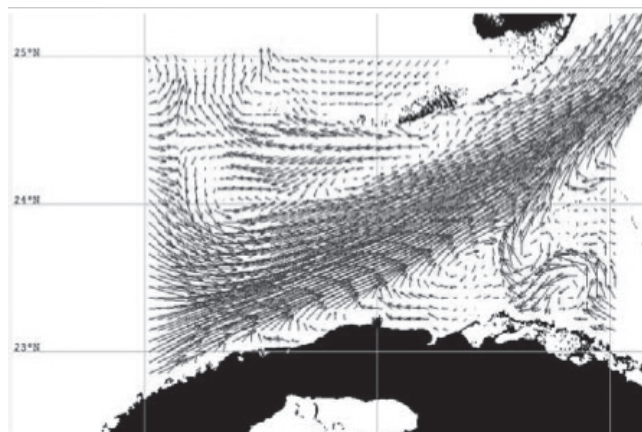


Fig. 3.7 Circulación oceánica proveniente del modelo HYCOM durante el 20 de agosto de 2013.

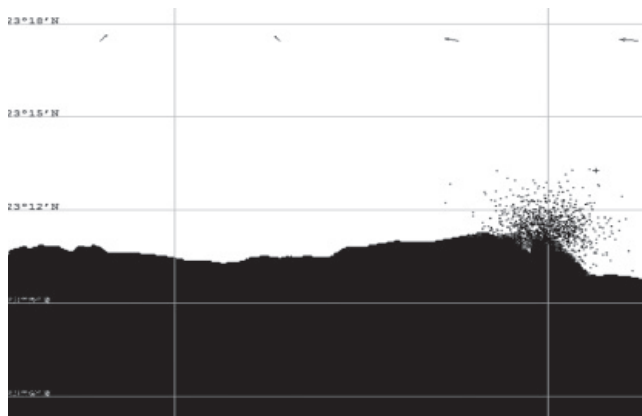


Fig. 3.8 Modelo Gnome. Costa de Boca de Jaruco contaminada después de transcurrido el tiempo de modelación. Campo de corrientes proveniente del modelo HYCOM.

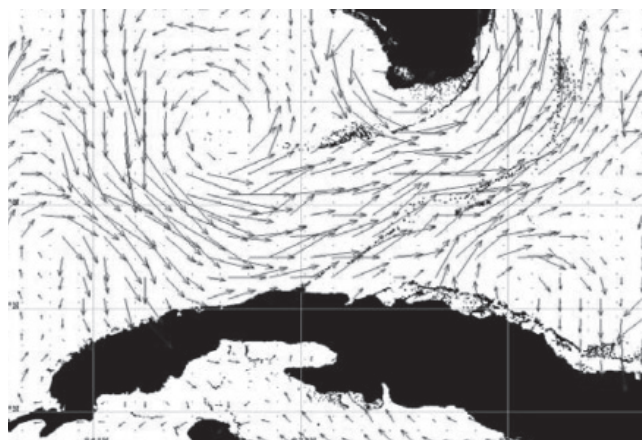


Fig. 3.9 Modelo Gnome. Costa de Boca de Jaruco y Cayo Sal contaminadas después de transcurrido el tiempo de modelación. Campo de corrientes proveniente de los modelos AOML/ NOAA CoastWatch del 23 al 30 de octubre de 2013.

### Escenario del derrame desde tierra firme durante un evento extremo

Esta simulación se realizó con el modelo Tari 3.0 y tuvo como objetivo valorar la trayectoria del derrame en aguas cubanas bajo un evento extremo.

#### Condiciones de la simulación:

El derrame se produce en la costa aledaña a Energías desde diez sitios cercanos a tierra. Para este propósito se utiliza el campo de corrientes del modelo OCCAM a una resolución de 8 km; se simulan derrames ocurridos bajo el huracán Dennis (categoría 5) que, por el occidente, atravesó el territorio cubano entre el 8 y el 9 de julio de 2005. Los derrames se planifican diariamente, con un tiempo de permanencia de las partículas en el agua de un día.

#### Trayectorias del derrame

el análisis diario de 3 000 trayectorias liberadas en diez sitios ubicados a 8 km de la planta Energías muestra que las partículas se dirigieron, preferentemente, hacia tierra cubana; se produjo una concentración de casi la totalidad del derrame en un extenso sector de la costa, desde la longitud  $-82.9351^{\circ}$  W hasta  $-78.1287^{\circ}$  W. La figura 3.10 presenta las trayectorias de las partículas virtuales de hidrocarburo bajo los efectos del huracán Dennis; las trayectorias tienen

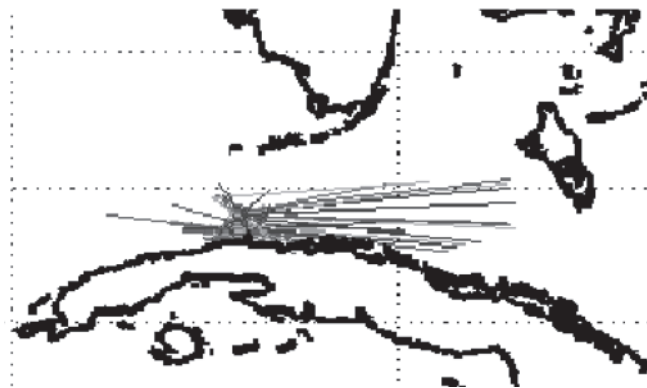


Fig. 3.10 Modelo Tari 3.0. Trayectorias bajo los efectos del huracán Dennis (8 de julio de 2005). El tiempo de las partículas en el agua es de un día.

direcciones que cubren los ángulos de un semicírculo que corresponde a la dirección de los vientos del huracán. Se observa que las partículas virtuales alcanzan grandes distancias después de un día de simulación; asimismo, el aumento de la velocidad de las corrientes y la incidencia de vientos huracanados propicia que las partículas arriben a lugares vecinos, tales como los canales de San Nicolás y Viejo de Bahamas, las Bahamas y a 10.5 km de los cayos de la Florida.

La cuantificación en porcentajes de 3 000 trayectorias muestra que el mayor porcentaje de las partículas liberadas permanece en aguas cubanas después de un día de ocurrido el derrame (Fig. 3.11). Las partículas de petróleo arriban a la Florida, los canales de San Nicolás y Viejo de Bahamas, y las Bahamas con una probabilidad significativamente menor; este escenario lo favorece el huracán Dennis, que acelera las corrientes marinas y modifica el patrón de circulación en un área extensa. Bajo la órbita del huracán, las corrientes marinas rotan en sentido antihorario y entran al territorio cubano con gran velocidad, y promueven el traslado hacia la costa cubana de los derrames virtuales.

### Sección III

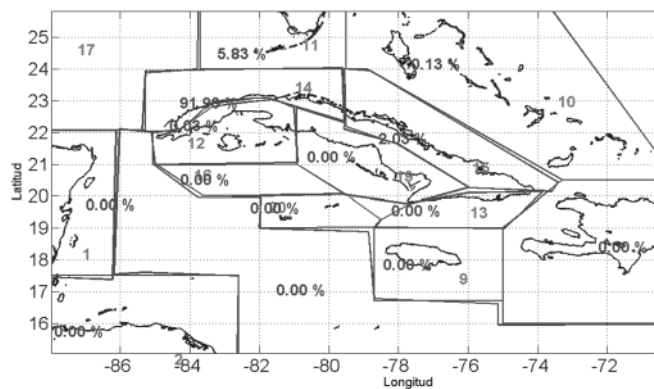


Fig. 3.11 Modelo Tari 3.0. Porcentaje de las partículas que arriba a polígonos en el Caribe después de un día. Nótese el arribo de 91.9 % a la región noroccidental de Cuba; 5.8 % a la Florida; 2 % a los canales de San Nicolás y Viejo de Bahamas, y 0.13 a las Bahamas.



### *Simulación de un derrame proveniente del lavado de las sentinas*

El intenso tráfico de buques de carga y embarcaciones destinadas a la recreación en la región del Gran Caribe (RGC) causa gran preocupación, puesto que la generalidad de estas naves de carga no poseen tanques para contener los desechos; por consiguiente, es probable que las aguas residuales se descarguen en las aguas costeras debido a que la mayoría de los países de la región carecen de instalaciones portuarias para la recepción de aguas residuales a que se refieren los anexos I y V de MARPOL (<http://www.enviro-pak.net/marpol>).

El área de estudio está sujeta a un gran trasiego de barcos diversos: petroleros, de carga general, cruceros, pesqueros y(o) de recreo. Según información de la Defensa Civil de Cuba, alrededor de 25 buques de cabotaje con arqueo entre 900 t y 16 540 t circulan por las aguas cubanas; los informes del puesto de control de tráfico de Paredón Grande reafirman el paso de, aproximadamente, 1 800 buques mensuales, de estos casi 40 % son petroleros, lo cual le confiere a la región una vulnerabilidad extrema.

### *Condiciones de la simulación realizada con el modelo Gnome:*

Con el siguiente escenario se simula el posible lugar de salida de un derrame virtual producido por la limpieza de sentinas de un barco de carga. Bajo las condiciones de viento variable proporcionadas por el Instituto de Meteorología, el derrame arriba a las costas de Jaruco transcurridos tres días y 22 h. El programa Gnome se corre de modo invertido, o sea, teniendo el derrame en la costa cubana y la trayectoria final indica el punto de salida del vertimiento.

1. El viento desempeña un papel significativo en las condiciones futuras del vertimiento; la película fina sobre la superficie del mar es gobernada por las corrientes y el viento; de la velocidad del viento,

3 % incide sobre el vector resultante del derrame. A partir de este argumento se considera la velocidad del viento variable, entre 10 nudos y 22 nudos, y una dirección desde los cuadrantes I y IV.

2. La limpieza de sentina (virtual) es de 10 000 barriles de diésel.
3. El tiempo de liberación del diésel es de 1 h.
4. Se utiliza un coeficiente de difusión de  $10^5$  cm<sup>2</sup>/s para mover el vertimiento.

## **Resultados finales**

1. Del total del diésel liberado flotan 1 060 barriles (19.6 %) después de seis días.
2. Se evaporan o dispersan 7 890 barriles (78.9 %) del total liberado.
3. Se contamina Energas y la costa aledaña con 150 barriles (1.5%).
4. Finalmente, se ubica el barco que realiza la limpieza de sentinas en las coordenadas 23°41" N y 82°04" 34" W (Fig. 3.12).

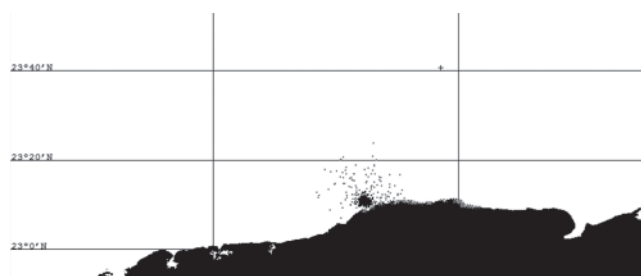


Fig. 3.12 Ubicación del derrame en las costas de Cuba (Energas, Boca de Jaruco) el 13 de marzo de 2012, a las 03:00h. Condiciones del viento: 10 nudos NNE.

### *Escenario de la trayectoria del contaminante bajo condiciones de frentes fríos*

Esta simulación realizada con el modelo Tari 3.0, y tiene el objetivo de valorar la trayectoria del derrame producido por la limpieza de sentinas de un barco en las inmediaciones del canal de la Florida (al norte de La Habana). Para este propósito se utiliza el campo de corrientes de los satélites ERS 1/2 y se simulan de-



rrames ocurridos entre febrero y marzo durante tres años consecutivos (1995, 1996 y 1997); en este período azotaron la región noroccidental de Cuba 16 frentes fríos, de estos solo dos fuertes, ocho de intensidad moderada y seis débiles (González, 1999).

Los derrames se planifican cada cinco días, con un tiempo de permanencia de las partículas en el agua de 15 a 20 días. El análisis de 7 500 trayectorias mostró que, bajo las condiciones establecidas, las limpiezas de sentinas virtuales producidas en febrero de 1995, 1996 y 1997 fueron gobernadas por la intensa corriente de la Florida. La división en porcentajes de la cantidad de partículas que arriba después de concluida la simulación indica que 100 % de las partículas arriba a las costas de América del Norte, mientras que la costa cubana no se afecta con el vertimiento (Figs. 3.13 y 3.14).

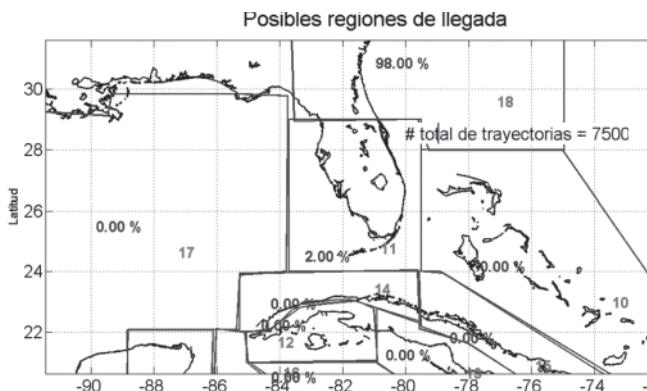


Fig. 3.13 Porcentaje de las partículas que arriba a polígonos en el Caribe después de un día de la liberación del hidrocarburo. A la península de la Florida arriba 100 % liberado.

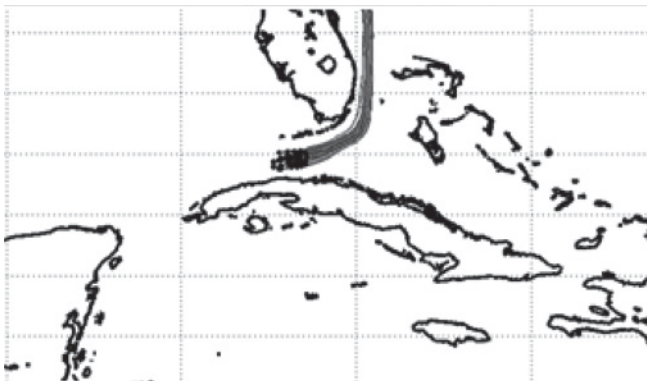


Fig. 3.14 Trayectoria de partículas virtuales liberadas en las inmediaciones del canal de la Florida el 27 de febrero de 1995.

## Conclusiones

La planta Energas, dada su posición geográfica, el sistema de corrientes imperante, y las actividades de exploración y explotación que se realizan a su alrededor, tiene el peligro de contaminarse por el derrame de hidrocarburos.

1. Los derrames producidos lejos de la costa cubana (*offshore*), en condiciones habituales, ofrecen mayor peligro de contaminación para la península de la Florida, mientras que existe una menor probabilidad de contaminación para la planta Energas. Los derrames que se producen bajo condiciones de huracán incrementan la probabilidad de contaminación de la planta y la costa aledaña, aunque la península de la Florida continúa siendo la de mayor peligro de contaminación.
2. Los derrames producidos en tierra (cercanos a la planta Energas), en condiciones climatológicas características, contaminan la planta y también pueden contaminar los cayos de la Florida. Bajo las condiciones de huracán aumenta el peligro de contaminación de la planta a 92 %.
3. Las limpiezas de sentinas cerca de Cuba, bajo condiciones climatológicas habituales, pueden contaminar la planta, aunque por el sistema de corrientes cercano a la planta, el mayor peligro lo corre la península de la Florida. Bajo condiciones de frentes fríos, los derramamientos por la limpieza de sentinas en alta mar y al norte de la planta son arrastrados por la fuerte corriente de la Florida y contaminan, principalmente, los cayos y la costa este de la península de la Florida.

## Referencias bibliográficas

- ADIOS oil spill weathering model, NOAA HAZMAT (1995). Version 1.1.2.
- ÁLVAREZA. (2012): Estudio de peligro, vulnerabilidad

- y riesgo de las obras constructivas en la bahía de Mariel. Informe inédito. Agencia de Medio Ambiente. La Habana. Cuba
- Applied Science Associates, Inc. (ASA) (1997): Oilmap user's manual Applied Science Associates, Inc., Narragansett, RI.
- BERMÚDEZ, J., GONZÁLEZ, A., CASTRO, Y., ORTIZ E., Y CONCEPCIÓN, E. (2012): Evaluación de la contaminación por hidrocarburos de un ecosistema de manglar en el sector centro-sur de cayo Santa María, Jardines del Rey. (Poster presentado en el IX Congreso de Ciencias del Mar) Cuba.
- CALZADA, A., FERNÁNDEZ, K., GUILARTE, Y., RODRÍGUEZ, R., CASALS, R., AMBUEJE, Y., RODRÍGUEZ, N., PÉREZ, P. (2009): Resultado 1 del Proyecto Ramal: Simulación Numérica de las Corrientes Marinas y Campos de Oleaje, su Influencia Sobre los Derrames y el Transporte Oceánico de Hidrocarburos. Instituto de Meteorología. La Habana. Cuba
- CENTURIONI, L. & NILLER, P. (2003): On the surface of the Caribbean Sea. J. Geophys. Res., 30, 1279–1282.
- CORBETT & HOLT, L.L.C. (1997). Estrategia Regional para facilidades de Recepción Portuarias en el Manejo de Residuos en el Gran Caribe. Organización Marítima Internacional Proyecto WCISW. Reporte Final Volumen I.
- DELVIGNE, G.A.L., & SWEENEY C.E. (1988): Natural dispersion of oil. Oil & Chemical Pollution 4 (1988) 281–310.
- FOX, A., HAINES, K., DE CUEVAS, B., Y WEBB, D. (2000): Altimeter Assimilation in the OCCAM Global Model, Part II: TOPEX/Poseidon and ERS1 Data. Journal of Marine Systems, 26, 323–347.
- GARDINER, C. (1983): Handbook of stochastic methods for physics and the natural sciences. Berlin: Springer-Verlag (110 pp).
- GONZÁLEZ, C. (1999): Climatología de los frentes fríos que han afectado a Cuba desde 1916–1917 hasta 1996–1997. Revista Cubana de Meteorología Vol. 6. No.1.
- GUTIÉRREZ A. (2003): Vulnerabilidad de la cayería entre cayo Francés y cayo Caimán a la contaminación por hidrocarburos. Contribución a la Educación y la Protección Ambiental. ISBN 959–7136–20–1. 22.
- GUTIÉRREZ, A. (2003a, 2004,2005): Capitulo: Aguas Marinas. En Línea Base Ambiental para la solicitud de la Licencia Ambiental del Proyecto: Prospección petrolera en la ZEE de Cuba en el Golfo de México. (Informe inédito. CESIGMA, La Habana. Cuba.).
- GUTIÉRREZ, A. (2009): Capítulo: Investigaciones oceanográficas. (Informe presentado por la República de Cuba ante la Comisión de Límites de la Plataforma Continental de Naciones Unidas para demostrar la prolongación natural de la plataforma continental más allá de las 200 millas marinas en la zona sector oriental del Golfo de México (zona oriental).
- GUTIÉRREZ, A. (2013): *Dispersión y caoticidad de partículas pasivas en las aguas oceánicas de la región occidental de Cuba*. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Meteorológicas. La Habana: Instituto de Oceanología ISBN 978–959–298–030–3.
- GUTIÉRREZ, A. Y ÁLVAREZ, A. (2008): Los remolinos oceánicos: mecanismos físicos de retención de partículas Contribución a la Educación y la Protección Ambiental. Vol. 8.185–196 ISBN 959–7136–20–1.
- GUTIÉRREZ, A. Y ÁLVAREZ, A. (2012a): Variabilidad espacial y temporal de los remolinos oceánicos en la región suroccidental de Cuba. Serie Oceanológica. Vol11. ISSN. 2072–800X.
- GUTIÉRREZ A., BAIRES J. Y ÁLVAREZ, A. (2012b): Dispersión de larvas de langosta en el Caribe basada en simulaciones numéricas. Rev. Cub. de Invest. Pesq. vol. 29, No. 1, ISSN 0138–8452.
- GUTIÉRREZ, A., ÁLVAREZ, A., FRÍAS, P., Y ALFONSO, I. (2009): Informe Final del Proyecto:

- Los procesos oceanográficos y su relación con especies marinas de interés comercial. Importancia regional y trascendencia extraregional. Publicado por el Programa Ramal de Ciencia e Innovación Tecnológica. Protección del Medio Ambiente y el Desarrollo Sostenible Cubano (1999-2009). Agencia de Medio Ambiente, La Habana, Cuba.
- GUTIÉRREZ, A., PÉREZ, J., BARBEITO, R., Y MOREAU, P. (1996): Estudio de las características hidrológicas y de la circulación de las aguas oceánicas en la costa norte de Cuba durante septiembre de 1996. (Informe inédito, GEOCUBA Estudios Marinos, La Habana. Cuba.).
- GUTIÉRREZ, A., PÉREZ, J., BARBEITO, R., Y MOREAU, P. (1997): Estudio de las características hidrológicas y de la circulación de las aguas oceánicas en la costa norte de Cuba durante diciembre de 1997. (Informe inédito, GEOCUBA Estudios Marinos, La Habana. Cuba.).
- GUTIÉRREZ, A., PÉREZ, J., BARBEITO, R., Y MOREAU, P. (1998): Estudio de las características hidrológicas y de la circulación de las aguas oceánicas alrededor de Cuba durante septiembre de 1998. (Informe inédito, GEOCUBA Estudios Marinos, La Habana. Cuba.).
- GUTIÉRREZ, A., PINA, F., Y VILA, L. (2005): Estrategias para el manejo de zonas costeras vulnerables a la contaminación por hidrocarburos. En: *Humedales de Iberoamérica*. Argentina: Red CYTED-Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. (182 pp).
- IPIECA (1995) Informe: Impactos biológicos de la contaminación por hidrocarburos: Costas Rocosas. IPIECA 1995. Producido en asociación con ARPEL. ([http:// www.ipieca.org/](http://www.ipieca.org/))
- IPIECA (1997) Informe: Impactos biológicos por contaminación por hidrocarburos: Pesquerías, IPIECA 1997. Producido en asociación con ARPEL. ([http:// www.ipieca.org/](http://www.ipieca.org/))
- JAYKO, K. & HOWLETT, E. (1992): Oilmap an interactive oil spill model, OCEANS 92, October 22-26, 1992, Newport, RI.
- KIRSTEIN, B., CLAYTON, J. R., CLARY, C., PAYNE, J. R., MCNABB, D., FAUNA, G., AND REDDING, R., (1985): Integration of suspended particulate matter and oil transportation study, Mineral Management Service, Anchorage, Alaska.
- OHEY, L.Y. & WANG, D.P., (2009): Modeling waves and currents produced by Hurricanes Katrina, Rita, and Wilma. U.S. Dept. of the Interior, Minerals Management Service, Herndon, Virginia. OCS Study MMS 2009-060. xviii + 135 pp.
- OKUBO, A. (1970): Horizontal dispersion of floatable particles in the vicinity of velocity singularities such as convergences. Deep-Sea Res., 17, 445-454.
- PROVENZALE, A., BABIANO, A., & ZANELLA, A. (1998): Dynamics of Lagrangian tracers in barotropic turbulence. In *Mixing, Chaos and Turbulence*. New York: Plenum. (340 pp)
- Proyecto de Ciclo Combinado Energías S.A. Boca de Jaruco, (2010): Formulario del documento de diseño del proyecto (MDL DDP) -Versión 04.1.
- REED, M., E. GUNDLACH, & T. KANA (1989): A coastal zone oil spill model: development and sensitivity studies, *Oil and Chemical Pollution*, Vol. 5, p. 411-449.
- ROMAN, L. (2005): *A Short Introduction to Numerical Analysis of Stochastic Differential Equations*. Brasil: IMPA. (70 pp).
- Sawford, B. (2001): Turbulent Relative Dispersion. *J. Fluid. Mech.*, 33, 289-317.
- SPAULDING, M. L., OPISHINSKI T. & HAYNES S. (1996): COASTMAP: An integrated monitoring and modeling system to support oil spill response, *Spill Science and Technology Bulletin*, Vol. 3, No. 3, pp. 149-169.
- SPAULDING M. L., KOLLURU V. S., ANDERSON E. & HOWLETT, E. (1994): Application of three dimensional oil spill model (Wosm/Oilmap) to hindcast the Braer spill, *Spill Science and Technology Bulletin*, Vol. 1, No. 1, 23-35.
- SOLTURA, R., MON, S., RODRÍGUEZ, G., BÁEZ, R., Y AYALA, L. (1995): Atlas eólico de Cuba. Estadística y

Climatología. Potenciales climáticos de generación Eolo-eléctrica y bombeo eólico (Informe de Resultados). La Habana, Cuba. Instituto de Meteorología.

VIAMONTES, J. (2005): Las corrientes marinas en la Zona Económica Exclusiva de Cuba en el Golfo de México. (Informe inédito). Geocuba Estudios Marinos. La Habana, Cuba.

WATSON, D. E. (1992): Contouring: A guide to the analysis and display of spatial data. Tarrytown, NY.: Pergamon Elsevier Science, Inc. (230 pp).

WEISS, J. (1991): The dynamics of entropy transfer in two-dimensional hydrodynamics. *Physica D.*, 48, 273-294.