

## Prediction of trajectory and fate of the Nissos Amorgos oil spill

**José Rincón, Miguel Reyes and Sandra Viada\***

Laboratorio de Simulación Computacional, Departamento de Energía  
Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia  
Apartado 10482, Maracaibo, Venezuela. E-mail: jrincon@luz.ve

\*Instituto para el Control y la Conservación de la Cuenca del Lago de Maracaibo, ICLAM

### Abstract

This paper presents the trajectory modeling results of the oil spill occurred in the Gulf of Venezuela as result of the hull damage of the tanker Nissos Amorgos. The computational code "DROG3D" developed at North Carolina University (USA) was used to described drogue trajectory, under the influence of the tidal currents. The local tidal and current information was obtained from another Finite Element based code which solves the shallow water equations. The prediction of the oil slick trajectory and its visual reports are in good agreement and the final oil location was spotted within the zone indicated by the model.

**Key words:** Oil spill, prediction, trajectory, Nissos Amorgos, DROG3D.

## Predicción de la trayectoria y destino final del derrame petrolero del Nissos Amorgos

### Resumen

Este trabajo presenta los resultados del modelaje de la trayectoria de derrame de petróleo ocurrido en el Golfo de Venezuela como consecuencia de la ruptura del casco del tanquero Nissos Amorgos. El programa de computación usado fue el DROG3D desarrollado en la Universidad de Carolina del Norte (EE.UU.). Este programa describe la trayectoria de una partícula inerte, sometida a la acción de las corrientes. La información de las mareas y corrientes locales es obtenida a su vez de otro programa, basado en el método de elementos finitos y que resuelve las ecuaciones de la mecánica de fluidos para mareas litorales. Las predicciones de la trayectoria de la mancha y las observaciones visuales "in situ" están en buena concordancia y la deposición final del crudo fue ubicada en la zona indicada por el modelo.

**Palabras clave:** Derrame de petróleo, predicción, trayectoria, Nissos Amorgos, DROG3D.

### Introducción

El día Viernes 28 de Febrero de 1997 a las 11 p.m., el tanquero Nissos Amorgos encalló en el canal de navegación en el Golfo de Venezuela y su casco se rompió derramando 25,460 barriles de crudo Bachaquero (11.9° API) en el sitio de varadura y a lo largo de la trayectoria que siguió luego de ser desencallado. La mayor parte del crudo (16,000 barriles aproximadamente) fue liberado en el sitio donde ocurrió la varadura ubicada a

una latitud de 11 2,133' N y una longitud de 71 35,661' W. El impacto ambiental de este accidente no ha podido todavía estimarse.

La determinación de las corrientes y mareas imperantes en el Sistema Lago de Maracaibo-Golfo de Venezuela se hizo usando el programa tridimensional QUODDY5 [1], basado en el método de Elemento Finito (MEF). Este campo de velocidades fue el utilizado para calcular la trayectoria y destino de la mancha de crudo.

Un modelo numérico computacional desarrollado originalmente en la Universidad de Carolina del Norte, y adaptado y modificado en el Laboratorio de Simulación Computacional de la Universidad del Zulia fue usado para simular el transporte y el destino final de la mancha de petróleo en el Golfo de Venezuela. El modelo lagrangiano de trayectoria de flotadores fue usado para predecir la dinámica de una mancha de aceite sometida a la marea (básicamente a la componente M2, predominante en el golfo [2]) y al viento (vientos Alisios predominantes en la zona).

La predicción de trayectoria de derrames usando programas de computación ha sido usada intensamente en los últimos accidentes de este tipo, por los grupos encargados de aliviar estas contingencias. Ejemplos de este tipo de programas son: el GULFSLIK I desarrollado por Lehr y Cekirge [3] y utilizado para simular el transporte y destino de los derrames de crudo en el Golfo Pérsico durante la ocupación de Kuwait por las tropas iraquíes; el modelo OSSM [4] de la Agencia Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos (NOAA) utilizado por Galt *et al.* [5] en el derrame de Nowruz al norte del Golfo Pérsico en 1983; el SLIKFORCAST usado por Krogh [6] en el derrame de Hasbah en el Golfo Pérsico en 1980; y el OILPOL desarrollado por Al-Rabeh *et al.* [7] y usado en el derrame de Al-Ahmadi durante la guerra del Golfo.

Este artículo presenta los resultados de la aplicación del programa DROG3D, desarrollado en la Universidad de Carolina del Norte por Blanton y Werner [8] para la predicción de trayectorias de flotadores, el cual fue adaptado y utilizado por los autores de este trabajo, para simular el transporte, ruta y destino final del mencionado derrame de crudo en el Golfo de Venezuela.

### Características físicas del sistema lago de Maracaibo-Golfo de Venezuela

El sistema Lago-Golfo está localizado en la esquina nor-occidental de Venezuela entre las latitudes 9° y 12° N y longitudes 70° y 73° W como se muestra en la Figura 1. Consiste de un cuerpo oceánico de agua llamado Golfo de Venezuela, el cual está conectado a través de un estuario parcialmente mezclado constituido por la Bahía El Tablazo y el estrecho de Maracaibo, al Lago de Maracaibo.

El Golfo de Venezuela es una región rectangular con 180 Km. de longitud y 75 Km. de ancho aproximadamente. Su profundidad promedio es de 30 mts. y está delimitado en su parte más septentrional por una línea que se extiende entre la Península de la Guajira y la Península de Paraguaná. En su parte sur el Golfo de Venezuela se comunica con la bahía de El Tablazo a través de

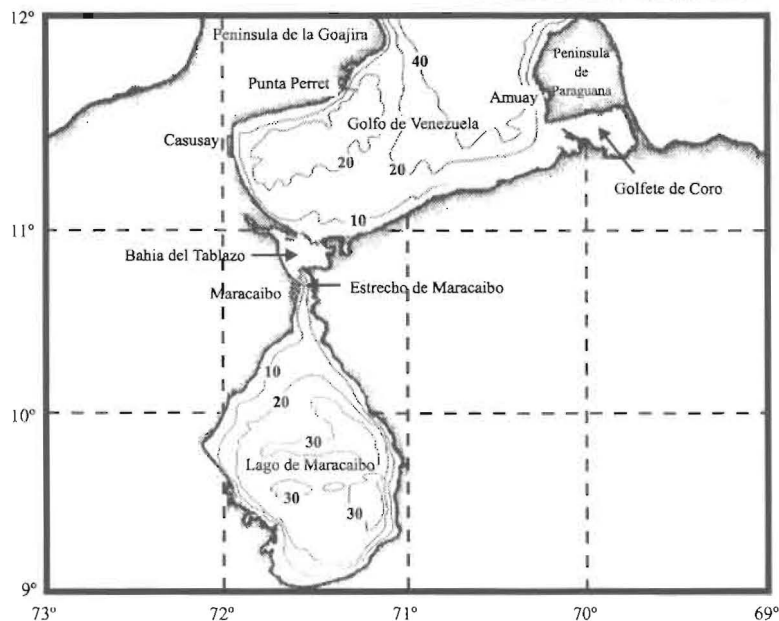


Figura 1. Sistema Lago de Maracaibo-Golfo de Venezuela.

tres bocas (San Carlos-Zapara, Cañonera y Cañonera). La boca San Carlos-Zapara es la más amplia, con 1,5 Km. de anchura y a través de la cual pasa un canal de navegación, continuamente dragado a una profundidad de 13.5 mts. [1]. Los vientos predominantes en todo el sistema son los vientos alisios los cuales soplan en la dirección Nor-Este.

### Análisis de la trayectoria y destino del derrame

La trayectoria del derrame se determinó usando el modelo DROG3D [8], el cual modela la mancha como un flotador representativo del centro de masa de la misma. Este tipo de modelo es muy útil para respuestas tácticas en tiempo real y para el diseño de planes de contingencia, ya que permite predecir el lugar y el momento en el que estará la mancha en su recorrido. Para calcular la trayectoria del flotador el modelo resuelve las siguientes ecuaciones diferenciales ordinarias:

$$\frac{dx}{dt} = u \quad (1)$$

$$\frac{dy}{dt} = v \quad (2)$$

$$\frac{dz}{dt} = w \quad (3)$$

donde  $x$ ,  $y$  y  $z$  son las coordenadas del flotador;  $u$ ,  $v$  y  $w$  son las componentes cartesianas de la velocidad del agua y  $t$  es el tiempo. Estas ecuaciones son resueltas usando el método de Runge-Kutta de 5to orden [9], pero la información del campo de velocidades del fluido que arrastra la partícula es obtenida de otro modelo que simula la hidrodinámica de aguas poco profundas.

La hidrodinámica del Sistema Lago-Golfo correspondiente al período seco (no lluvioso) y a la magnitud de los vientos imperantes en el momento del derrame, fue obtenida usando el programa QUODDY basado en el MEF, que permite la solución tridimensional de las ecuaciones de la mecánica de los fluidos aplicadas a las mareas litorales.

La forma tridimensional de las ecuaciones que gobiernan la hidrodinámica de aguas poco profundas son las siguientes:

Continuidad

$$\nabla \cdot \bar{V} = 0 \quad (4)$$

Momentum Horizontal

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla \bar{v} + g \nabla_{xy} \zeta + \bar{f} \times \bar{v} - \frac{\partial}{\partial z} \left( N \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) = 0 \quad (5)$$

donde  $v$  es el vector velocidad,  $\zeta$  es la elevación de la superficie libre,  $g$  es la gravedad,  $f$  es el vector de Coriolis,  $\nabla_{xy}$  es el operador gradiente horizontal y  $N$  es la viscosidad vertical. La forma verticalmente promediada de las ecuaciones (2) y (3), son combinadas para obtener la ecuación tridimensional de la onda para aguas poco profundas [10], i.e.

$$\frac{\partial^2 H}{\partial t^2} + \tau_0 \frac{\partial H}{\partial t} - \nabla_{xy} \left[ \nabla_{xy} \cdot (H \bar{v} \bar{v}) \right] + g H \nabla_{xy} \zeta + \bar{f} \times H \bar{v} - \tau_0 H \bar{v} - H \psi + H \Gamma(\bar{v}_b) = 0 \quad (6)$$

donde:  $H$  es la profundidad total ( $H = h + \zeta$ );  $h$  es la profundidad batimétrica;  $\psi$  y  $\Gamma$  son funciones asociadas a los esfuerzos en la superficie y el fondo.

Así, el procedimiento de cálculo consiste en resolver la ecuación (6) para obtener  $\zeta$  luego la ecuación (5) para obtener  $V$  y por último se usa la ecuación (4) para obtener la componente vertical de la velocidad  $w$ . El dominio es dividido en elementos prismáticos triangulares lineales de 6 nodos. Mas detalles del modelo pueden ser obtenidos de Lynch *et al.* [11]. El programa proporciona información de velocidades y mareas en todos los puntos nodales.

Toda esta información es alimentada al programa DROG3D y un trazador virtual fue liberado en la localización geográfica del derrame, a una profundidad de 50 cm. La hora del lanzamiento del flotador se hizo poniendo en fase la información disponible en el mareógrafo de Malecón (un punto cercano al sitio del derrame) y las predicciones del modelo hidrodinámico.

La simulación reveló que durante las primeras 24 horas el derrame se movió dirigido por la marea principalmente, pero luego fueron los fuertes vientos los que determinaron que se moviera hacia la orilla Occidental y bañara toda la costa en dirección noroeste. La Figura 2 presenta las predicciones obtenidas por el modelo compa-

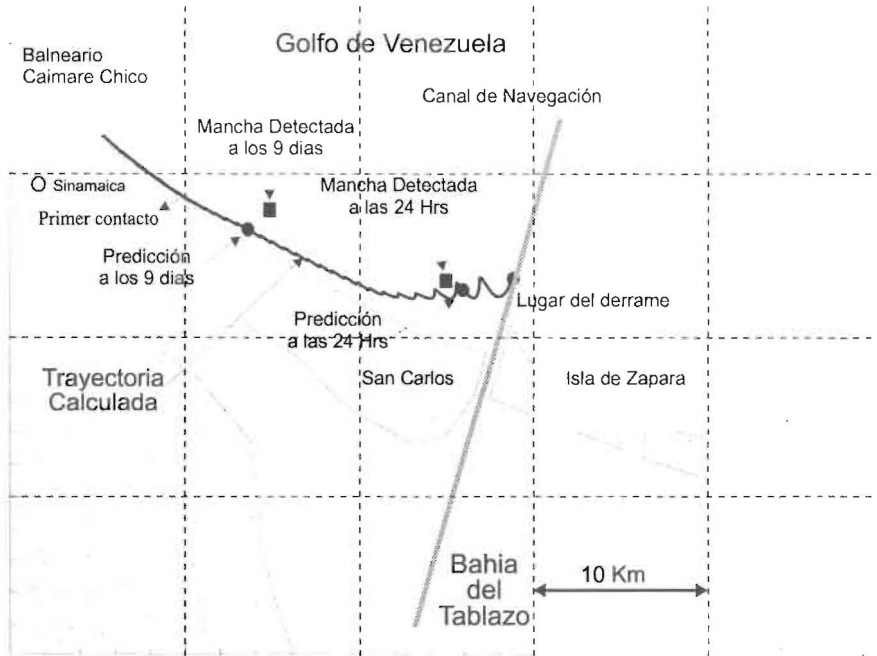


Figura 2. Comparación de las predicciones y los reportes visuales de la posición de la mancha.

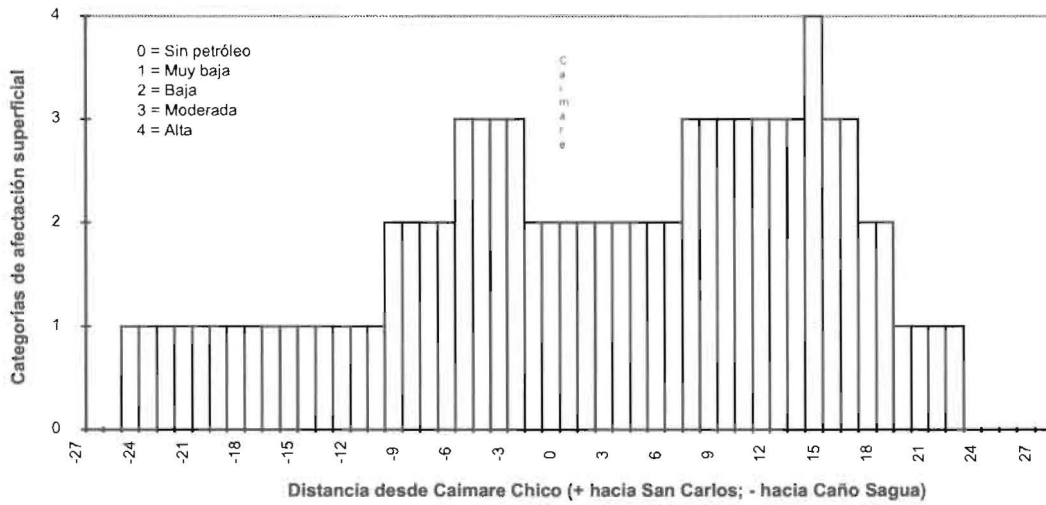


Figura 3. 1º SCAT. Zona Intermarial de Activa Afectación Superficial. 15 al 17/03/97.

radas con los reportes visuales de las manchas de petróleo a 24 horas y 216 horas.

El volumen estimado de crudo recogido en la costa en los primeros días fue de 991 barriles, lo cual inmediatamente obligó a preguntarse dónde estaba el resto del petróleo, confiando en las predicciones del modelo el crudo fue rastreado y localizado en las zonas intermareal y de rompientes de la costa, procediéndose a cuantificar la cantidad de crudo mezclado con la arena me-

dante la técnica de SCAT [12] cuyos resultados son presentados en las Figuras 3, 4 y 5 donde se puede notar que la zona con mayor concentración o "zona caliente" está localizada en el sitio donde el modelo predice el primer impacto del derrame sobre la costa i.e. a 14 Km. del balneario Caimare Chico. Tomando en cuenta que parte del crudo se disuelve en el agua y que otra fracción se evapora, el balance de masa indica que prácticamente todo el crudo procedente del derrame fue a parar a las costas Nor-Occidentales del Golfo en

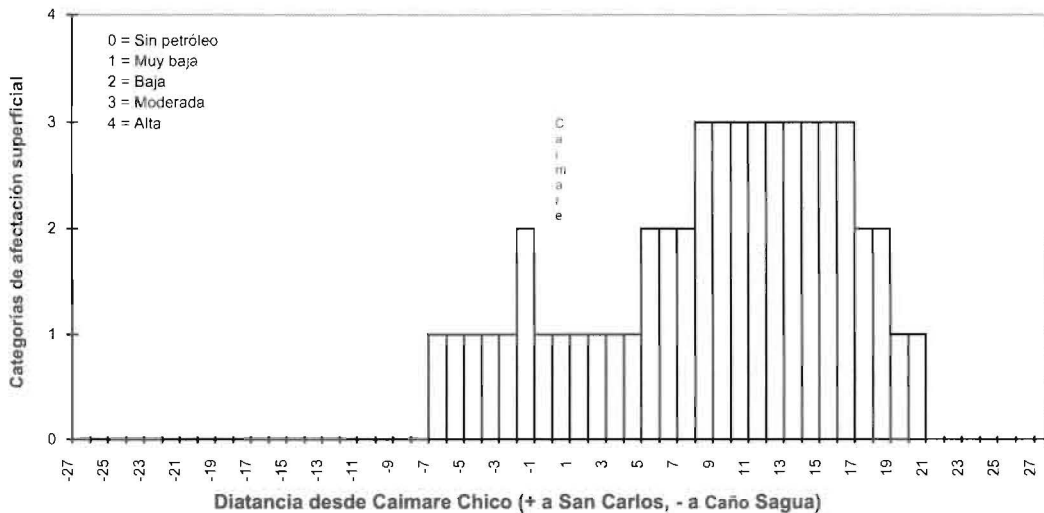


Figura 4. 2º SCAT. Zona Intermareal de Activa Afectación Superficial. 22/03/97.

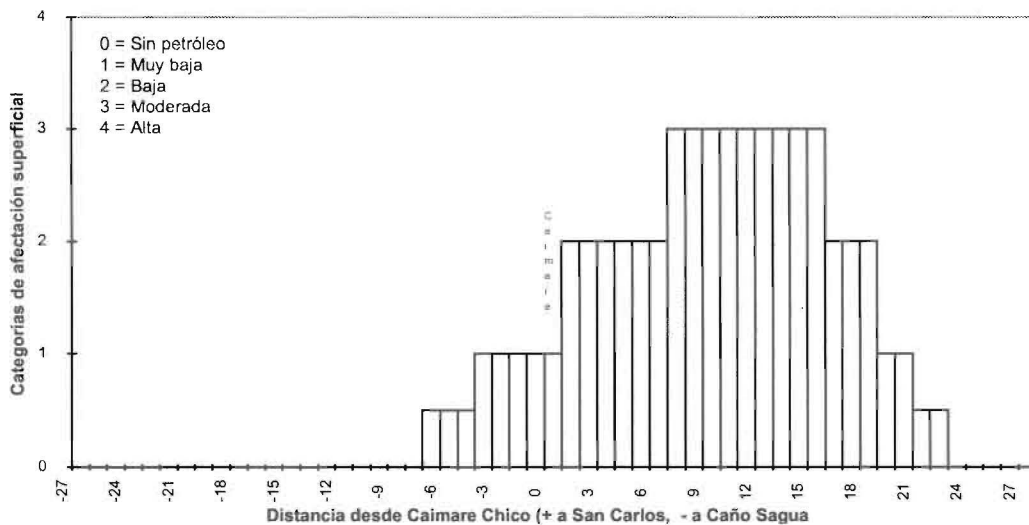


Figura 5. 3º SCAT. Zona Intermareal de Activa Afectación Superficial. 28/03/97.

las inmediaciones del balneario Caimare Chico, afectando principalmente la población de almejas, chipi-chipis, el fitoplancton y en menor grado inmediato a peces y aves. El crudo se encuentra "entrampado" en localizaciones dispersas bajo la arena y actualmente se trabaja en su remoción.

**Conclusiones**

Se llevó a cabo la simulación del recorrido seguido por el derrame petrolero del tanquero Nissos Amorgos, usando el modelo lagrangiano de trayectoria de flotadores DROG3D. Las predicciones fueron usadas para dar soporte a la

respuesta táctica del derrame, su ubicación, cuantificación y recolección. La comparación entre la trayectoria predicha y las observaciones visuales de la mancha muestran que el programa DROG3D produce resultados razonablemente precisos en la predicción de trayectorias de derrames.

**Referencias Bibliográficas**

1. Lynch D. y Werner F.: "Three-Dimensional Hydrodynamics on Finite Elements. Part II: Non-Linear Time-Stepping Model", Int. J. Num. Meth. Fluids, Vol. 12. (1991).112-126.

2. Molines J. M. y Fornerino M., "Proyecto de Investigación: Circulación en el Lago de Maracaibo", Convenio LUZ-ICLAM, Universidad del Zulia. Facultad de Ingeniería, Dpto. de Hidráulica. Maracaibo 1985.
3. Lehr, W. y Cekirge, H. "GULFSLICK I, a Computer Simulation of Oil Spill Trajectories in the Arabian Gulf", Research Institute, KFUPM Report N° 25, Saudi Arabia.(1979).
4. Galt, J., Payton, D. L., Torgrimson, G. M. y Watabayashi, G. "Internal Report of National. Ocean and Atmos. Agency NOAA", Seattle, Washington(1983).
5. Galt, J., Payton, D. L., Torgrimson, G. M. y Watabayashi, G. "Trajectory Analysis for the Nowruz Oil Spill" en M. I. El- Sabh (ed.), Oceanographic Modeling of the Kuwait Action Plan, UNESCO Reports in Marine Sciences No 28, 55. (1984).
6. Krogh, F. "Computer Simulation of Oil Spill, IMCO/UNEP Workshop on combating marine pollution from oil extrapolation, exploitation and transport in the Kuwait Action Plan region", Bahrain.(1980).6-10.
7. Al-Rabeh, A. H. Cekirge, H. y Gunay, N., "OILPOL, Computer Simulation of Oil Spill", Appl. Math. Modelling, Vol. 13, (1989). 322-345.
8. Blanton, B., "DROG3D User's Manual for 3-Dimensional Drogue Tracking on a Finite Element Grid with Linear Finite Elements", Ocean Processes Numerical Method Laboratory, University of North Carolina at Chapel Hill, Release 95.1.(1995).
9. Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T. and Flannery B. P. "Numerical Recipes in FORTRAN" Cambridge University Press. 1992
10. Linch, Daniel R., Werner, Francisco E., Molines, Jean Marc and Fornerino Mariana., "Tidal Dynamics in a Coupled Ocean/Lake System", Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol. 31,(1990). 319-343.
11. Linch, Daniel R., and Werner, Francisco E., "Wave Equation Hidrodynamics on Simple 3-D Elements". Proceedings of the VIIth International Conference of Finite Elements and Flows Problems (Chung, T. J. and Karr, G. R., eds.). The University of Alabama in Huntsville Press. (1989). 1373-138.
12. Godoy Gonzalo, "Aplicación de los métodos SCAT, SCAT subacuático y muestreos de fondo para ubicar y evaluar el crudo derramado por el B/T NISSOS AMORGOS ocurrido el 28/02/97 en el Golfo de Venezuela." . Gerencia de Investigación Ambiental. ICLAM. (1997).

Recibido el 13 de Octubre de 1997

En forma revisada el 2 de Septiembre de 1998