

Three-dimensional oil spill transport and dispersion at sea by an event of blowout

Luis Otero-Díaz ^a, Jorge O. Pierini ^b, Paulo Chambel-Leitao ^c, Madalena Malhadas ^d, Joao Ribeiro ^e,
Jose Chambel-Leitao ^f & Juan Restrepo ^g

^a Departamento de Física, Universidad del Norte, Colombia. ljotero@uninorte.edu.co

^b CIC-CCT BB, Universidad Nacional del Sur, Argentina. jpierini@criba.edu.ar

^c HIDROMOD, Portugal. paulo.chambel@hidromod.com

^d HIDROMOD, Portugal. madalena.malhadas@hidromod.com

^e HIDROMOD, Portugal. joao.ribeiro@hidromod.com

^f HIDROMOD, Portugal. jose.chambel@hidromod.com

^g Departamento de Física, Universidad del Norte, Colombia. restrepojc@uninorte.edu.co

Received: Abril 25th, 2013. Received in revised form: March 27th, 2014. Accepted: June 5th, 2014.

Abstract

The simulated droplet trajectories of the 3-D model at the Caribbean platform showed that droplets with a diameter of $50 \mu\text{m}$ formed a distinct subsurface plume, which was transported horizontally and could remain below the surface. This plume could have a very restricted area of impact because the dispersion is only controlled by the ocean currents which, at 1000 m depth, have a low intensity and are quite turbulent. In this case, the formed plume stayed trapped at 1000 m depth, not posing a risk to the Caribbean Coast. In contrast, droplets with diameters of $250 \mu\text{m}$, 1 and 10mm rose rapidly to the surface, even with different velocities ($6, 10, 20 \text{ms}^{-1}$).

Keywords: Blowout; hydrodynamic; spread; oil spill.

Transporte y dispersión tridimensional de un derrame de petróleo en el mar debido a un evento "blowout"

Resumen

Las trayectorias de las gotas simuladas con el modelo 3-D de dispersión de petróleo en la plataforma del mar Caribe colombiano mostraron que las gotas con diámetro de $50 \mu\text{m}$, forman una pluma subsuperficial, la cual es transportada horizontalmente y puede permanecer debajo de la superficie por largo tiempo. Esta pluma podría tener un impacto muy restringido, porque la dispersión es controlada solamente por las corrientes oceánicas, las cuales a 1000 metros de profundidad, tienen baja intensidad y son poco turbulentas. En este caso, la pluma formada permanece atrapada a 1000 metros de profundidad, no poniendo en riesgo la costa Caribe. En contraste, las gotas con diámetros de $250 \mu\text{m}$, 1mm y 10mm , se elevaron rápidamente a la superficie, aun con diferentes velocidades ($6, 10, 20 \text{ms}^{-1}$).

Palabras clave: Blowout; hidrodinámica; dispersión; mancha de petróleo.

1. Introducción

Generalmente, el transporte y la dispersión del petróleo derramado en la superficie del mar son gobernados por los procesos físicos, químicos, y biológicos que dependen de las condiciones hidrodinámicas, meteorológicas y de las características ambientales del hidrocarburo [1]. Estos procesos, que influyen la dinámica del transporte del crudo

derramado, incluyen la advección, la difusión turbulenta, la dispersión superficial, la evaporación, la disolución y la emulsificación. Cuando el petróleo se derrama en la superficie del mar, se dispersa y forma una película fina llamada mancha de petróleo [2]. Por lo tanto, los modelos de derrames de petróleo juegan un papel importante en la evaluación de los riesgos e impactos sobre los recursos naturales debido a derrames, tanto reales como potenciales. También son útiles

para el desarrollo de estrategias en la planificación y respuesta ante emergencias por accidentes que involucran el vertido de hidrocarburos en el mar [3].

En la actualidad existe un gran número de modelos disponibles para la simulación de derrames de petróleo, sin embargo la mayoría de ellos utilizan aproximaciones semi-empíricas [4,5], para el seguimiento de la mancha de petróleo, para la evaluación de la evaporación y para el cálculo de las pérdidas de masa del hidrocarburo debido a su interacción con el medio [6]. La nueva generación de modelos tiene la capacidad de predecir el arrastre, el transporte subsuperficial y la resuspensión del vertido de petróleo en la columna de agua [7,8].

En las últimas tres décadas, muchos investigadores han estudiado los procesos de transporte y destino de los derrames de petróleo en el mar, basados en el método de trayectorias [1,9-10]. Usualmente, este tipo de modelos han sido bidimensionales y emplean parámetros constantes y/o variables que integran el efecto del viento y de las velocidades de las corrientes, para calcular la velocidad de la mancha de petróleo en la superficie del agua [3]. Muchos de estos modelos de derrame de hidrocarburos se centran en el movimiento que tiene la mancha de petróleo en la superficie, utilizando aplicaciones tradicionales para describir la dispersión en el plano horizontal [2]. Diferentes estudios basados en datos de campo, laboratorio y modelación [10,11] han demostrado claramente la importancia de la dimensión vertical en la dinámica del petróleo. Estos estudios han comprobado que el movimiento natural del petróleo no solo juega un rol importante en el cálculo del balance de masas, sino también en la determinación de la distribución espacial y temporal del petróleo en la superficie del mar [3].

Han sido pocos los trabajos de investigación que se han publicado sobre la distribución vertical del petróleo en la columna de agua, pero se sabe que las gotas de mayor flotabilidad pasan más tiempo en las capas superficiales y son advectadas aún más debido a las corrientes superficiales que las gotas más pequeñas [2,12]. La difusión de la mancha de petróleo es entonces un proceso tridimensional (3-D) que es controlado por la distribución del tamaño de la gota de petróleo y por los procesos de difusión de corte [2,12].

En este caso de estudio, el modelo MOHID se aplicó a la región de la Costa Caribe de Colombia para simular un derrame de petróleo asociado con un escenario de "Blowout" a 1500 m de profundidad. Para esta modelación, ha sido desarrollado y aplicado un algoritmo discreto de partículas Lagrangianas para simular el movimiento vertical de las gotas de petróleo en la columna de agua. Esta aplicación es en tres dimensiones y consiste en la predicción de la mezcla vertical de las gotas de petróleo en el tiempo, suponiendo diferentes tamaños de diámetro de las mismas.

El objetivo de este estudio es el de comprender y evaluar el impacto de un derrame de petróleo en áreas protegidas a lo largo de la Costa Caribe Colombiana (Parque Nacional Natural Corales del Rosario y San Bernardo), por lo que es importante contar con un enfoque del modelo en 3-D. Este tipo de estudios no son comunes, por el grado de dificultad y complejidad de los procesos involucrados. Para el Caribe Colombiano, hasta el momento, no se conoce sobre la

realización de este tipo de análisis.

Tradicionalmente se utilizan aproximaciones 2D, para evaluar las trayectorias de derrame de hidrocarburos, tal y como ocurrió en la mayoría de evaluaciones realizadas del derrame en el Golfo de Méjico. Uno de los pocos trabajos que han sido realizados en esta región es el de [13]. Estos autores utilizan para la evaluación de las trayectorias 3D aproximaciones probabilísticas basadas en técnicas de Montecarlo.

Esta aproximación presenta inconvenientes ya que parametriza algunos procesos físicos, dejando de lado fenómenos no lineales que pueden ser importantes en la dinámica oceanográfica. Por el contrario, en el presente trabajo, la dinámica 3D es tomada en cuenta de forma continua durante las simulaciones numéricas, generando una situación más realista y acorde con las condiciones oceanográficas presentes en la zona de estudio. Para ello fue implementado un algoritmo especial en el modelo, que permite en cada paso del tiempo la interacción entre la dinámica de corrientes 3D y las partículas de petróleo.

2. Modelo Matemático

Para el desarrollo del presente trabajo, se aplicó en el área de estudio el Sistema de Modelado MOHID, que es una herramienta integrada de modelación para sistemas acuáticos, tanto fluviales como marinos. En la Fig. 1, se presenta un esquema de la estructura del sistema MOHID para simular los derrames de petróleo. El módulo hidrodinámico de MOHID calcula y actualiza el flujo de información a partir de la solución de las ecuaciones primitivas de Navier-Stokes en el espacio tridimensional para fluidos incompresibles. Una descripción detallada del modelo se encuentra en [14]. La información hidrodinámica (corrientes y niveles) necesaria para calcular las trayectorias del petróleo es entonces transferida al modelo de transporte Lagrangiano, el cual calcula su evolución espacial utilizando esta información [15]. El módulo de envejecimiento del petróleo, originalmente desarrollado por [16], utiliza las variables del módulo hidrodinámico y del módulo de transporte Lagrangiano, para calcular la densidad, la viscosidad, y los procesos de envejecimiento del hidrocarburo.

Específicamente para este estudio fue incorporado un nuevo componente vertical de la velocidad de las partículas de petróleo, basado en la formulación presentada por [2].

La velocidad de las gotas de petróleo está determinada por su tamaño, viscosidad del agua de mar y la diferencia de densidades del agua de mar y del tipo de hidrocarburo vertido [2]. El diámetro crítico de las gotas de petróleo es calculado mediante la siguiente fórmula [17]:

$$d_c = \frac{9.52\nu^{2/3}}{g^{1/3}(1-\rho_o/\rho_w)^{1/3}} \quad (1)$$

Para gotas de petróleo de diámetro pequeño $d_i < d_c$, la ley de Stokes, proporciona la velocidad de boyancia estacionaria:

$$u_{LS} = gd_i^2(1-\rho_o/\rho_w)/18\nu \quad (2)$$

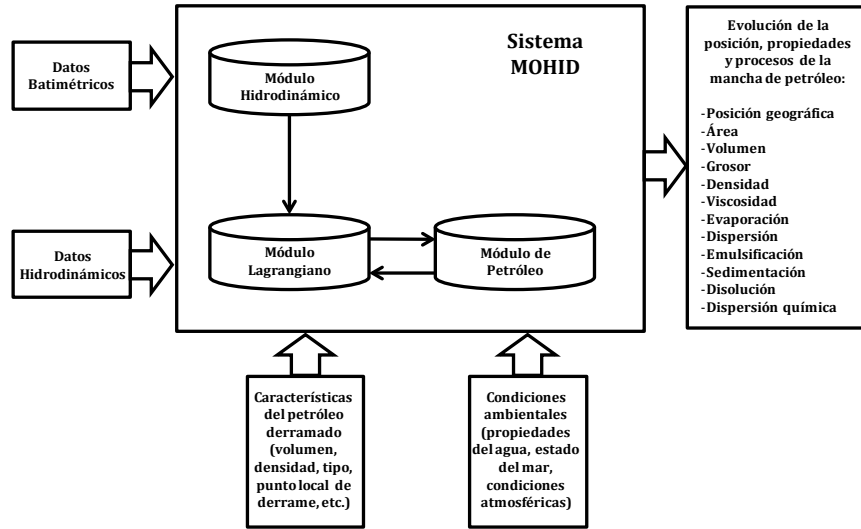


Figura 1. Diagrama esquemático del funcionamiento del modelo de pronóstico de evolución de hidrocarburos. Fuente: Los autores.

Para gotas de petróleo de mayor diámetro $d_i \geq d_c$, la ley de Reynolds proporciona la velocidad de boyancia estacionaria:

$$u_{LR} = \sqrt{\frac{8}{3}gd_i(1-\rho_o/\rho_w)} \quad (3)$$

Donde ν es la viscosidad del agua de mar, g la aceleración de la gravedad, mientras que ρ_o y ρ_w son la densidad del petróleo y del agua de mar, respectivamente. La velocidad de ascenso vertical de las gotas de petróleo pueden tener diferentes órdenes de magnitud dependiendo de los diámetros (e.g. para 30 y 300 μm les corresponden 0.06 y 6 m ms^{-1} , respectivamente, según las ecuaciones 1, 2 y 3). Estas velocidades verticales controlan fundamentalmente si las gotas de petróleo alcanzan o no la superficie, si ellas forman plumas superficiales (o subsuperficiales), y determinan la extensión y dirección de la dispersión horizontal en las diferentes capas de la columna de agua.

Para el tipo de petróleo considerado en este trabajo (densidad = 920 kg m^{-3}), y suponiendo una densidad del agua de 1030 kg m^{-3} , el diámetro crítico es de 210 μm (Fig. 2). Las velocidades para los diámetros inmediatamente por encima del crítico son del orden de 2.5 cm s^{-1} , e inmediatamente por debajo del orden de 2.5 m ms^{-1} . Además, las velocidades verticales de las corrientes en esta área y a esta profundidad (1000 a 1500 m) varían entre 0.5-5 m ms^{-1} . Esto significa que las gotas con un diámetro inferior al crítico, tendrían velocidades más bajas o del mismo orden de magnitud que las velocidades de las corrientes verticales, y por consiguiente tendrán la tendencia a ser dispersadas, principalmente debido a la acción de las corrientes oceánicas a través de las diferentes capas en la

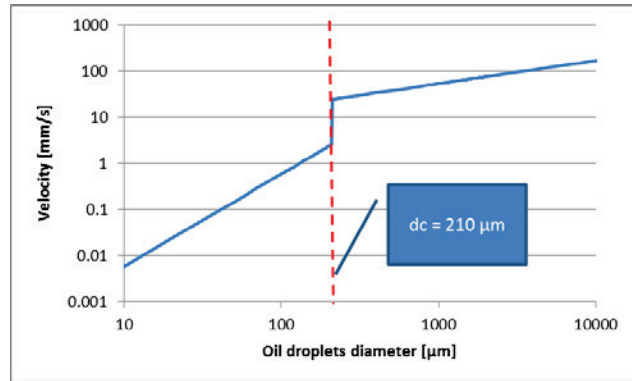


Figura 2. Velocidad vertical de las gotas de petróleo en función de su diámetro para un tipo de hidrocarburo con densidad de 920 kgm^{-3} [2]. Fuente: Los autores.

columna de agua. Las gotas con un diámetro superior al diámetro crítico tendrán velocidades superiores a las velocidades de las corrientes y alcanzarán por consiguiente la superficie rápidamente.

3. Aplicación del modelo de derrame en el Mar Caribe

En esta sección se efectúa una descripción de la implementación llevada a cabo en la región del mar Caribe de Colombia del modelo de derrame de petróleo en 3-D. La descripción incluye la configuración, adaptación y puesta en funcionamiento de los modelos hidrodinámicos y del modelo de trazadores Lagrangianos, así como de las simulaciones realizadas. Esta aplicación en 3-D sigue una metodología similar a la presentada por [12] para el "derrame de Deepwater Horizon" en el Golfo de Méjico en abril de 2010.

El principal objetivo de la implementación del modelo de derrames de hidrocarburos en 3-D es para ilustrar el

comportamiento en tres dimensiones de la pluma de petróleo en función de la dimensión de las gotas de crudo. La idea con esta aproximación es validar la hipótesis implícita del enfoque en 2-D, consistente en que la pluma se eleva muy rápido hacia la superficie (del orden de minutos o pocas horas), para un determinado tamaño de las gotas de petróleo. Otro de los objetivos que se persigue es presentar una metodología sencilla [18] para reducir la escala (temporal y espacial) de los campos oceanográficos y meteorológicos a soluciones de baja frecuencia (alta resolución temporal), como los que proporciona el Sistema de Pronóstico Oceánico en Tiempo Real (RTOFS, por sus siglas en inglés) (<http://polar.ncep.noaa.gov/ofs/>) o MyOcean (<http://www.myocean.eu.org/>). [18].

3.1. Área de estudio

El área de estudio del potencial derrame de petróleo (Fig. 3, polígono amarillo) se encuentra localizada en proximidades a la Costa Caribe Colombiana. Dentro de las zonas insulares más importantes se encuentra el parque Natural Nacional Corales del Rosario y San Bernardo, localizado a 100 km al sur de Cartagena de Indias. La amplitud de la marea a lo largo de la costa del Caribe es una mezcla de tipo semidiurno, con amplitudes máximas de 60 cm [19]. Los vientos predominantes son del este, noreste y norte en la Península de La Guajira y del noreste al norte, al sur de la Sierra Nevada de Santa Marta, aunque en algunas épocas del año se registran vientos del oeste y noroeste.

El clima de la costa Caribe se caracteriza generalmente por dos periodos climáticos principales, llamados época seca (verano) que va desde los meses de diciembre a marzo, y época húmeda (invierno) que va desde los meses de agosto a noviembre, con una época de Transición en los meses de abril a julio, [20].

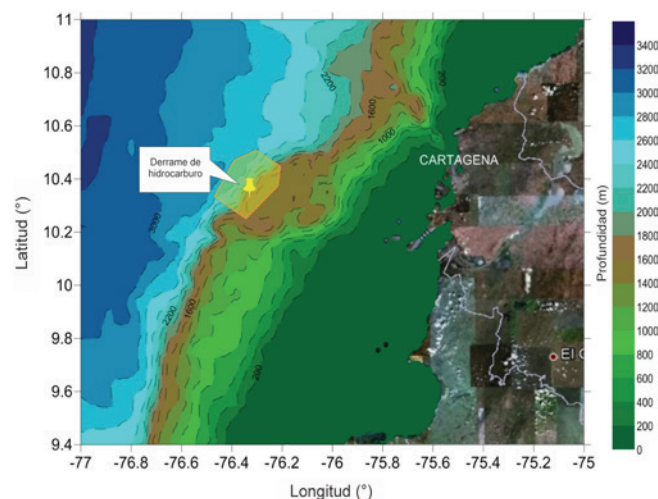


Figura 3. Área de estudio - Cuenca Caribe Colombiana. El polígono de color amarillo delimita el lugar considerado para el potencial derrame de petróleo.

Fuente: propia.

3.2. Datos de entrada

3.2.1. Batimetría

La información batimétrica para la construcción de las mallas de cálculo que serán utilizadas por los modelos numéricos en este estudio, fue obtenida de la base de datos global de batimetrías GEBCO (General bathymetric chart of the Oceans - <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/gebco/>) y de batimetrías de las cartas náuticas locales levantadas por la Dirección General Marítima (DIMAR) de Colombia. Las principales características batimétricas son presentadas en la tabla 1 y los dominios computacionales de los modelos en la Fig. 4.

3.2.2. Información Meteorológica y Oceanográfica

La información meteorológica y oceanográfica empleada para la puesta a punto de los modelos numéricos incluye vientos, flujos de superficie, corrientes, salinidad, temperatura y olas. El viento y los flujos de superficie (temperatura del aire, humedad, presión, radiación solar, etc) para el forzamiento atmosférico, fueron obtenidos de la base de datos globales de viento de la NASA (<http://worldwind.arc.nasa.gov/>) y del Sistema de Pronósticos Globales (GFS, por sus siglas en inglés <http://nomads.ncdc.noaa.gov/>). Los datos de la NASA y de las salidas del sistema GFS tienen 0.22° y 0.5° de resolución

Tabla 1. Principales características de los dominios batimétricos.

Dominio	Coordenadas	Dimensiones (dx dy)	Resolución (km/°)
Golfo de México	-99.0°W 5.5°N -54.7°W 42.9°N	174x147	25/0.22
Cuenca Caribe Colombiana	-81.4°W 6.5°N -70.9°W 15.7°N	205x180	5/0.045
Área del Proyecto	-77.1°W 9.3°N -74.7°W 11.0°N	230x163	1/0.009

Fuente: Los autores

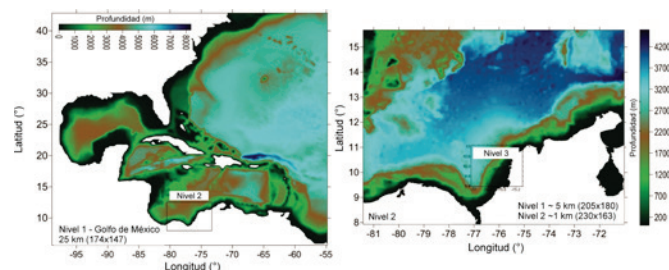


Figura 4. Dominios anidados para el modelo en 3-D de derrames de petróleo. El nivel 1 incluye el Mar Caribe y Golfo de México, el nivel 2 la cuenca Caribe Colombiana y nivel 3 la Costa Central Caribe de Colombia.

Fuente: propia. espacial respectivamente. Ambos tienen una resolución temporal de 3 horas y 7 días de pronóstico.

La información de corrientes, salinidad y temperatura para el forzamiento del módulo hidrodinámico proviene del Sistema de Pronóstico Oceánico en Tiempo Real (RTOFS, por sus siglas en inglés) manejado por la NOAA (<http://polar.ncep.noaa.gov/ofs/>) basado en el modelo “Hybrid Coordinate Ocean Model” (HYCOM, <http://hycom.org/>). La resolución espacial de las salidas de este modelo es de $1/12^\circ$. Los resultados tridimensionales (3-D) del modelo tienen una resolución diaria.

La información relativa al oleaje, para el bloque hidrodinámico y de transporte, fue incluida a partir de las series de estados de mar proporcionadas por el modelo WAVEWATCH III (<http://polar.ncep.noaa.gov/waves/>). Las variables tenidas en cuenta fueron: dirección de pico (Dp), periodo de pico (Tp) y altura significante (Hs). El modelo tiene una resolución espacial de $1.2^\circ \times 1^\circ$ y cuatro salidas diarias.

3.3. Configuración del modelo

Para simular la dispersión 3-D de un derrame de petróleo debido a un episodio de Blowout a 1500 metros de profundidad en la costa del Caribe Colombiano, fue implementado un modelo de seguimiento de partículas off-line que utiliza los resultados hidrodinámicos 3-D, previamente almacenados. El diseño off-line fue elegido para concentrar el poder de cómputo en el funcionamiento de un número suficiente de partículas que permitan asegurar la robustez estadística de los resultados del modelo [12]. La configuración del modelo consiste en proporcionar los campos hidrodinámicos generados por el modelo MOHID (www.mohid.com) en 3-D de la Región de la Costa Caribe, como datos de entrada para el modelo de seguimiento de partículas Lagrangiano. La configuración del modelo implementado para este estudio se compone de 3 niveles de anidamiento (Fig. 4), tabla 1.

En el dominio del Mar Caribe-Golfo de México se configuró un modelo barotrópico 2-D. El nivel del mar se supone que es igual a la solución de marea global FES2004 en la frontera abierta [21]. Como condiciones iniciales se definió un gradiente nulo de superficie libre y velocidad nula en todos los puntos de malla. El paso de tiempo es de 240 s y la viscosidad de remolino horizontal es de $250 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

El dominio en la Cuenca Caribe Colombiana (Nivel 2) es un modelo 3D baroclínico con 40 capas cartesianas en vertical. Las condiciones en las fronteras abiertas en este nivel de malla de cálculo se definieron de la siguiente manera: (i) Condiciones de frontera radial barotrópica (nivel del mar y velocidades barotrópicas) con una solución exterior (o de referencia) igual a la solución del nivel 1 más la solución RTOFS (promedio diario). En este caso, el nivel 1 corresponde a la componente de alta frecuencia de la solución exterior, mientras RTOFS es la de baja frecuencia; (ii) Relajación (o empuje) a lo largo de la frontera abierta para los valores de salinidad y de temperatura interpolados directamente de la solución RTOFS. También existe la relajación para el campo de velocidad 3D resultado de la interpolación de la solución RTOFS más las velocidades del

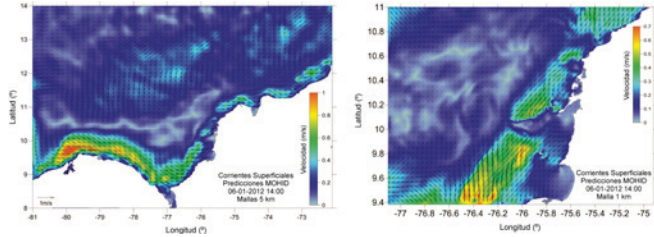


Figura 5. Velocidad de las corrientes superficiales obtenidas por el modelo hidrodinámico 3-D en la Cuenca y costa del Caribe Colombiano.

Fuente: Los autores

nivel 1; (iii) El paso de tiempo es de 120 s y la viscosidad de remolino horizontal es de $50 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

En la región de la Costa Caribe Colombiana (nivel 3), también se implementó un modelo 3D baroclínico anidado en el dominio de la Cuenca del Caribe Colombiano (nivel 2). Se utilizó la misma discretización vertical del nivel 2 (40 capas cartesianas). Para la definición de las condiciones de frontera, se utilizó una metodología similar a la seguida en el nivel 2. Sin embargo, en este caso, la solución exterior barotrópica sólo se deriva del nivel 2, y el procedimiento de relajación se realiza para los valores de salinidad, temperatura y velocidad interpolados directamente desde el nivel 2 al nivel 3. En este caso, el segundo nivel va a incorporar los componentes de alta y baja frecuencia. El paso de tiempo es de 40 s, y la viscosidad de remolino horizontal es $10 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Esta metodología de anidación se describe en detalle en [18].

La salida del modelo hidrodinámico incluye los campos 3-D de temperatura, salinidad, tres componentes de la velocidad y la altura de la superficie del mar. Un ejemplo de las velocidades de las corrientes arrojadas por el modelo hidrodinámico 3-D en los dominios de la Cuenca del Caribe Colombiano y de la Costa Colombiana se puede apreciar en la Fig. 5.

El segundo paso consiste en la implementación de un modelo Lagrangiano de derrame de petróleo. Las propiedades del agua, el nivel del mar, las tres componentes de las velocidades, la salinidad, la temperatura y difusividades son interpolados para la malla, donde es ejecutado el modelo de partículas. Se asume que a las partículas le son asignadas las características de gotas de petróleo, incluyendo el diámetro y la densidad. Las trayectorias de las partículas se evalúan mediante un seguimiento en tres dimensiones, utilizando la advección, mezcla y velocidades de ascenso de las gotas de petróleo.

Se asume una emisión continua (aproximadamente $0.04 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), por 24 horas con las mismas características del petróleo descritas para la configuración del modelo 2-D. Posterior a esas primeras 24 horas de vertido, se deja evolucionar el modelo durante 3 días continuos para cada escenario. Las partículas fueron emitidas en la localización -76.33° W y 10.33° N (Fig. 2) a 1500 metros de profundidad. El objetivo es analizar la estructura 3-D de la pluma de petróleo y no el impacto del “Blow Out”. Un total de 10 mil partículas fueron emitidas durante la simulación.

Fueron llevadas a cabo cuatro simulaciones para el período del 6 al 9 de enero de 2012. Las simulaciones se definieron de acuerdo al diámetro de las gotas de petróleo,

las cuales se presentan en la tabla 2. El modelo Lagrangiano utiliza como entrada los campos hidrodinámicos 3-D generados por el modelo MOHID para el dominio computacional de la cuenca del Caribe

4. Resultados y discusión

Las predicciones de la posición para las gotas de petróleo de tamaño 50 μm se presentan en la Fig. 6 (a- vista a lo largo de la plataforma, b- vista frontal de la plataforma). El mismo tipo de resultados, pero para tamaños de gotas de 250 μm , 1 mm y 10 mm se muestra en las Fig. 7-9.

Los resultados de las simulaciones 3-D indican que el diámetro de las gotas de petróleo influye significativamente en el movimiento del petróleo en la columna de agua. Las distribuciones de las partículas en profundidad indican que dos tipos de plumas se podrían generar dependiendo del tamaño de las gotas de petróleo. Las partículas con diámetros de 50 μm , tienen bajas velocidades de ascenso ($\sim 0.08 \text{ m ms}^{-1}$ velocidad vertical), por debajo de las velocidades típicas, debido a la hidrodinámica local. En esta situación, la pluma de petróleo tiende a permanecer atrapada a unos 1.000 m de profundidad (Fig. 6). La dispersión de la pluma a través de la columna de agua tiende a ser horizontal (Fig. 6) debido a los procesos físicos (por ejemplo, mareas, olas y corrientes internas de densidad). El movimiento oscilante en profundidad de la pluma atrapada ($\sim 1.000 \text{ m}$) podría mantener la pluma debajo de la superficie durante un largo tiempo (escalas de tiempo del orden de meses).

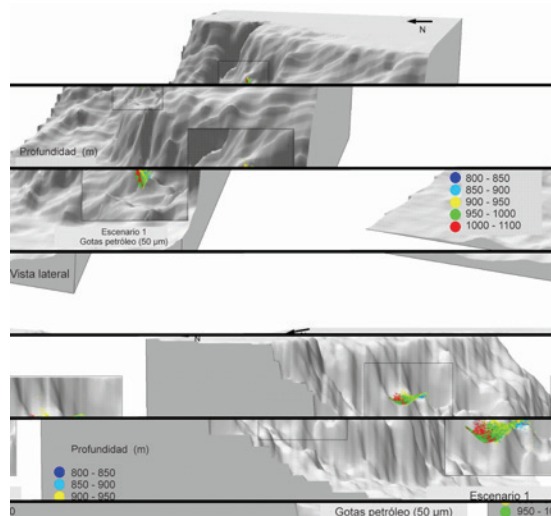


Figura 6. Posición de la partícula a lo largo de la columna de agua para el Escenario 1 - gotas de petróleo de tamaño de 50 μm : a) vista a lo largo de la plataforma y b) vista frontal de la plataforma.

Fuente: Los autores

ID Escenario	Periodo de Simulación	Diámetro gotas	Condiciones Hidrodinámicas	
1	6 al 9 de enero, 2012	50 μm	Corrientes	3-D Modelo MOHID
			Salinidad	3-D Modelo MOHID
			Temperatura	3-D Modelo MOHID
2	6 al 9 de enero, 2012	250 μm	Corrientes	3-D Modelo MOHID
			Salinidad	3-D Modelo MOHID
			Temperatura	3-D Modelo MOHID
3	6 al 9 de enero, 2012	1 mm	Corrientes	3-D Modelo MOHID
			Salinidad	3-D Modelo MOHID
			Temperatura	3-D Modelo MOHID
4	6 al 9 de enero, 2012	10 mm	Corrientes	3-D Modelo MOHID
			Salinidad	3-D Modelo MOHID
			Temperatura	3-D Modelo MOHID

Tabla 2. Periodos y principales características de las simulaciones realizadas para analizar la dinámica vertical de las gotas de petróleo. Fuente: Los autores

El comportamiento de este tipo de partículas también coincide con las predicciones realizadas por la aplicación del modelo SABGOM-LTRANS para el Golfo de México [12], donde las partículas menores a 50 μm permanecieron más de tres meses, sin alcanzar la superficie. Las predicciones de la pluma de petróleo generada por las gotas de 50 μm , sugieren un riesgo bajo para la región del Caribe Colombiano. Esto podría explicarse por el hecho de que la pluma permanece a bajas profundidades ($\sim 1.000 \text{ m}$) por largo tiempo.

Las partículas con diámetros de 250 μm , 1 mm y 10 mm se elevan rápidamente a la superficie (Figs. 7-9) con velocidades de ascenso de alrededor de 6, 10 y 20 cm s⁻¹. Las partículas de 250 μm toman alrededor de cuatro horas para llegar a la superficie. En el área del derrame de petróleo, las velocidades horizontales tienen intensidades típicas de 10 cm s⁻¹, lo que significa para las gotas de 250 μm un desplazamiento horizontal, antes de alcanzar la superficie, del orden de 2 km. El análisis de la velocidad de las gotas de petróleo presentado anteriormente (Fig. 2) predice claramente los dos tipos de dispersión descritos. Para las gotas de petróleo con un diámetro superior a 210 μm de diámetro (diámetro crítico), el petróleo llega a la superficie rápidamente. Las gotas por debajo del diámetro crítico se dispersan principalmente debido a los campos de corrientes 3-D del océano. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por [22].

En la superficie, la pluma se rige principalmente por los vientos, las olas y las corrientes superficiales, y es altamente dependiente de las condiciones instantáneas, lo que significa que el modelo de derrame de petróleo 2-D es una metodología válida. Después de llegar a la superficie, las partículas se quedan allí y comienzan a ser afectadas por la dispersión horizontal inducida por las corrientes, los vientos y las olas.

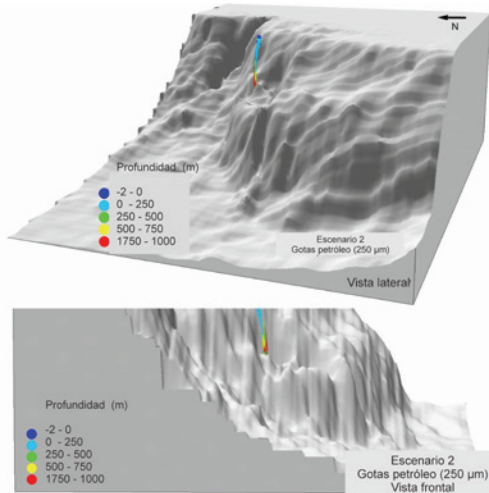


Figura 7. Posición de la partícula a lo largo de la columna de agua para el Escenario 2 - gotas de petróleo de tamaño de $250 \mu m$: a) vista a lo largo de la plataforma y b) vista frontal de la plataforma.
Fuente: Los autores

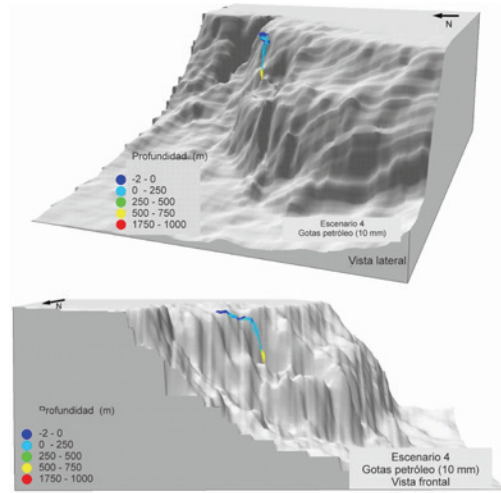


Figura 9. Posición de la partícula a lo largo de la columna de agua para el Escenario 4 - gotas de petróleo de tamaño de $10 mm$: a) vista a lo largo de la plataforma y b) vista frontal de la plataforma.
Fuente: Los autores

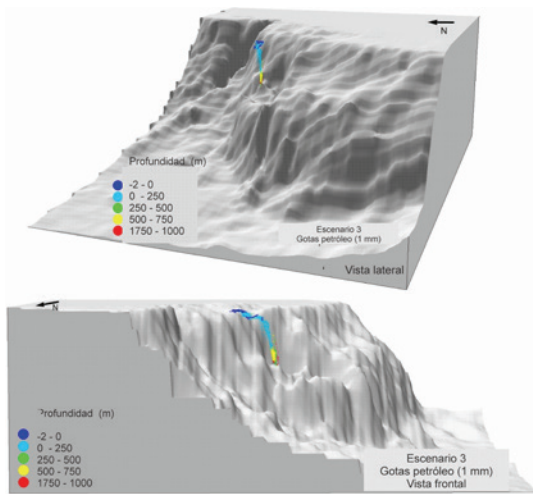


Figura 8. Posición de la partícula a lo largo de la columna de agua para el Escenario 3 - gotas de petróleo de tamaño de $1 mm$: a) vista a lo largo de la plataforma y b) vista frontal de la plataforma.
Fuente: Los autores

Durante el tiempo modelado, la pluma se desvía de la Región de la Costa Caribe, debido a las corrientes superficiales. Sin embargo, desde que la pluma en la superficie está controlada por los procesos de dispersión horizontal, en el caso de condiciones extremas de vientos persistentes, la pluma de petróleo podría viajar hacia la orilla y llegar a la región de la Costa Caribe Colombiana.

Otra de las contribuciones importantes de este trabajo, ha sido el desarrollo y aplicación de un algoritmo discreto de partículas que incorpora un nuevo componente vertical de la velocidad de las gotas de petróleo, basado en la formulación presentada por [2]. La velocidad de las gotas está determinada por su tamaño, la viscosidad del agua de mar y la diferencia de densidades del agua de mar y del tipo de hidrocarburo vertido. En el trabajo desarrollado por [12]

para el "derrame de Deepwater Horizon" en el Golfo de Méjico se utiliza una aproximación empírica para simular la dispersión en la columna de agua de las gotas de petróleo, sin tener en cuenta la viscosidad del agua de mar ni la componente de la velocidad vertical de las partículas de crudo.

5. Conclusiones

La zona turbulenta creada en el punto de liberación hace que el petróleo se fragmente en pequeñas gotas. Los tamaños de estas gotas varían en función de las condiciones de salida y las velocidades. Los datos presentados por [23] basados en trabajos de campo y laboratorio llevan a la conclusión de que la mayoría de las gotas liberadas bajo una situación de "Blowout" tienen un diámetro mayor a 250 micras (>90% del volumen de liberación). La misma conclusión se puede llegar con base en los datos experimentales del proyecto de DeepSpill [24]. Esto significa que la mayoría del petróleo liberado se elevará rápidamente a la superficie. Sin embargo, esta conclusión general debe ser adaptada a las características específicas del petróleo que se extrae y las condiciones de funcionamiento de la plataforma de explotación offshore.

En conclusión, puede establecerse que en caso de eventos de "Blowouts", deben ser analizados dos tipos de dispersión:

Enfocarse en el estudio de la mayoría del petróleo que es liberado (>90%) que alcanza la superficie casi en el mismo punto horizontal de la profundidad de liberación (diferencia de ~ 2 km). En este caso, el tradicional enfoque 2-D es válido.

Concentrarse en una pequeña fracción del petróleo vertido (<10%), pero que es muy tóxico. En este caso, la dispersión es controlada principalmente por la estructura hidrodinámica 3-D del océano. Esto significa que esta fracción de petróleo se dispersa muy lentamente. En el punto de liberación, las velocidades son muy turbulentas (no

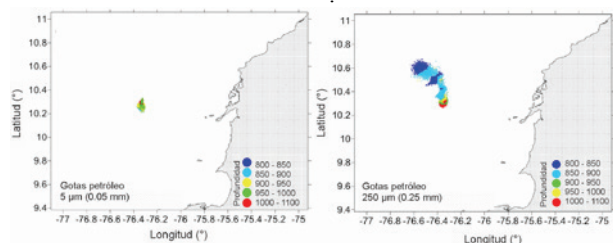


Figura 10. Vista en planta de la pluma de petróleo después de 3 días la simulación: figura de la izquierda - 50 μm y figura de la derecha - 250 μm . Fuente: Los autores

tienen una dirección clara) y son pequeñas (5-50 ms⁻¹ en sentido horizontal y vertical 0.5-5 ms⁻¹). Esto puede apreciarse claramente en la vista en planta, de la pluma petróleo para los escenarios de diámetros de gota de petróleo de 50 μm y 250 μm (Fig. 10)

La pluma asociada a gotas de petróleo de diámetro de 250 μm cubre un área horizontal de por lo menos dos órdenes de magnitud mayor al escenario de 50 μm . El área de impacto de las fracciones más disueltas tiende a ser restringido. El impacto sobre la cadena trófica de estos componentes más tóxicos del petróleo es el principal punto de preocupación a evaluar.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a ECOPETROL S.A (Compañía colombiana de Petróleos) y GEOTEC ingeniería Ltda.

Referencias

[1] Wang, S.D., Shen Y.M. and Zheng Y.H., Two-dimensional numerical simulation for transport and fate of oil spills in seas. *Ocean Engineering*, 32, pp.1556–1571, 2005

[2] Wang, S.D., Shen, Y.M., Zheng, Y.H., Guo, Y.K. and Tang, J., Three-dimensional numerical simulation for transport of oil spills in seas. *Ocean Engineering*, 35, pp.503–510, 2008.

[3] Reed, M., Turner, C. and Odulo, A., The role of wind and emulsification in modelling oil spill and drifter trajectories. *Spill Science and Technology Bulletin* 1 (2), pp.143-157, 1994.

[4] Fay, J.A., The spread of oil on a calm sea. In: D. Hoult (Ed.), *Oil on the Sea*. Plenum Press, 1969.

[5] Fay, J.A., Physical processes in the spread of oil on a water surface. In: *Proc. Conf. Prevention and Control of Oil Spills*, 15-17 June. American Petroleum Institute, Washington, DC, pp. 463-467, 1971.

[6] Tkalich, P., Huda, K. and Gin K., A multiphase oil spill model. *Journal of Hydraulic Research*, 41, No. 2, pp. 115–125, 2003.

[7] Elliot, A.J., Hurford, N. and Penn, C.J., Shear diffusion and the spreading of oil slicks. *Mar. Pollut. Bull.*, 17, pp. 308-313, 1986.

[8] Spaulding, M.L., Oil spill trajectory and fate modelling: State-of-the art review. In: *Proceeding of the Second International Oil Spill Research and Development Forum*, IMO, London, UK, 1995.

[9] Mackay, D., Paterson, S. and Nadeau, S., Calculation of the evaporation rate of volatile liquids. *Proceedings, National Conference on Control of Hazardous Material Spills*, Louisville, Ky., pp. 364-368, 1980.

[10] Johansen, E., The Halten Bank experiment observations and model studies of drift and fate of oil in the marine environment. In: *Proceedings of the 11th Arctic Marine Oil Spill Program (AMOP) Techn. Seminar*. Environment Canada, pp. 18-36, 1984.

[11] Singasaas, I. and Daling, P.S., Meso-scale test for laboratory weathering of oil. In: *Proceedings of the 158th Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar*, Environment Canada, pp. 55-66, 1992.

[12] North, E., Adam, E., Schlag, Z., Sherwood, C.R., He, R., Hyun K.H. and Socolofsky, S.A., Simulating oil droplet dispersal from the Deepwater Horizon spill with a Lagrangian approach, in Y. Liu et al., *Monitoring and Modeling the Deepwater Horizon Oil Spill: A Record-Breaking Enterprise*, *Geophys. Monogr. Ser.*, vol. 195, Washington, D. C., doi:10.1029/2011GM001102, 2011, pp. 217-226.

[13] Mariano, A., Kourafalou, V., Srinivasan, A., Kang, H., Halliwell, G., Ryan, E. and Roffer, M., On the modeling of the 2010 Gulf of Mexico oil spill, *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 52 (1-2), pp 322-340, 2011.

[14] Martins, F., Leitao, P., Silva, A. and Neves, R., 3D modelling in the sado estuary using a new generic vertical discretization approach. *Oceanologica Acta*, 24, S51–S62, 2001.

[15] Janeiro, J., Fernandes, E., Maritns, F. and Fernandes, R., Wind and freshwater influence over hydrocarbon dispersal on Patos Lagoon, Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, 56 (4): pp.650-665, 2008.

[16] Fernandes, R., *Modelação de derrames de hidrocarbonetos*. Graduation Thesis. Relatório Final. Instituto Superior Tecnico, Portugal, 2001.

[17] Lou, A.G., Wu, D.X., Wang, X.C. and XI, P.G., Establishment of a 3-D model for oil spill prediction. *Journal of Ocean*, University of Qingdao, 31 (4), pp.473-479, 2001.

[18] Leitao, P., Coelho, H., Santos, A. and Neves, R., Modelling the main features of the Algarve coastal circulation during July 2004: A downscaling approach. *Journal of Atmospheric & Ocean Science*. 10 (4), pp.421-462, 2005.

[19] Tuchkovenko, Y.S. and Calero, L., Mathematical modelo of the Ciénaga Grande de Santa Marta Ecosystem. *Bol. Invemar*, 32 (1), pp. pp.145-167, 2003.

[20] Andrade C., Barton E. and Mooers C., Evidence for an eastward flow along the Central and South American Caribbean Coast, *J. Geophys. Res.*, 108 (C6), 3185, doi:10.1029/2002JC001549, 2003.

[21] Lyard, L., Lefevre, F., Letellier, T. and Francis, O., Modelling the global ocean tides: Modern insights from FES2004. *Ocean Dyn.*, 56, pp. 394-415, 2006.

[22] Leitao, P.C., Malhadas, M.S., Ribeiro, J., Leitao, J.C., Pierini, J. and Otero, L., An Overview for simulating the blowout of oil spills with a Three-Dimensional model approach (Caribbean Coast, Colombia), in: M. Mateus y R. Neves, Eds., *Ocean Modelling for Coastal Management – case studies with MOHID*, IST Press, 2013, pp.97-115.

[23] Ross, S. L., Environmental Research Ltd., Fate and behavior of deepwater subsea oil well blowouts in the Gulf of Mexico. *Minerals Management Service*, 1997.

[24] Johansen, O., Rye, H., Melbye, A., Jensen, H., Serigstad, B. and Knusten, T., Deep spill JIP experimental discharges of gas and oil at helland hansen, Parts I, II, and III – Technical Report, SINTEF Applied Chemistry, Norway, 2001.

L.J. Otero-Díaz, es Oceanógrafo Físico del año 1999 de la Escuela Naval Almirante Padilla, MSc. en Ciencias y Tecnologías Marinas en 2003 y Doctor en Ciencias y tecnologías Marinas del año 2008, ambas de la Universidad de Cantabria (España). Desde 2000 hasta 2011 se desempeñó en la Armada Nacional de Colombia como Subdirector y Director del Centro Control Contaminación del Pacífico (CCCP), Subdirector del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe

(CIOH) y Decano de la Facultad de Oceanografía Física de la Escuela Naval Almirante Padilla. Actualmente es profesor tiempo completo del Departamento de Física de la Universidad del Norte (Barranquilla, Colombia). Sus intereses de investigación se enfocan en. Ondas en el océano, Amenazas Naturales de Origen marino: tsunamis, ondas de tormenta y oleaje extremo; Modelación numérica de procesos de transporte de sustancias contaminantes en el medio marino, Hidrodinámica en la zona de rompientes, Dinámica de estuarios, Manejo Integral de Zonas Costeras y Marinas.

J. O. Pierini, es Oceanógrafo Físico de la Universidad Nacional del Sur en Bahía Blanca, realizó estudios de Postgrado de Ingeniería Ambiental, MSc en Evaluación de Impacto Ambiental en España y Dr. de la Universidad de Buenos Aires en el Área de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. Desarrolla su trabajo de docencia en la Universidad Nacional del Sur e Investigación en el Centro Científico y Tecnológico de Bahía Blanca, en el Instituto Argentino de Oceanografía y la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires. El interés en investigación se centra en el Modelado numérico hidrodinámico y de procesos de transporte de contaminantes en el medio marino, modelos de calidad de agua y ecológicos, modelos de transporte de sedimentos, implementación de sistemas operacionales, dinámica de estuarios y procesos costeros.

J.Ch. Leitão, es Ingeniero Civil y Dr. en Ingeniería Mecánica de IST-Lisboa. Tiene 25 años de experiencia en modelado de sistemas acuáticos y en gestión de proyectos. Es socio y director de HIDROMOD desde 1992, donde ha participado en alrededor de 300 proyectos en Europa, África, América del sur y sudeste de Asia. Recientemente, coordinó el desarrollo de una plataforma de gestión de datos, dentro del proyecto SOWFIA, dirigido a los dispositivos de energía y evaluación ambiental de olas.

P.Ch. Leitao, es Ingeniero Civil y MSc. en Ecología, manejo y modelado de sistemas marinos. Es Dr. Ingeniería Ambiental del IST Lisboa. Es consultor y socio de HIDROMOD. Tiene 18 años de experiencia en la implementación y validación de modelos numéricos costeros hidrodinámicos, integración de modelos numéricos marinos en sistemas de previsión operativos, ha sido uno de los principales desarrolladores del modelo numérico de código abierto MOHID (<http://www.mohid.com>).

Dentro de los principales proyectos recientes se pueden mencionar: AquaSafe que tiene como objetivo aumentar la eficiencia en la gestión de operaciones, proporcionando información en tiempo real y su perfecta integración con herramientas de predicción y diagnóstico. Proyecto INSEA que consiste en un sistema de integración de datos para la evaluación de eutrofización en aguas costeras.

M.M. Santos-Malhadas, es Oceanógrafo Físico, MSc. en Ciencias Ambientales y Dr. en Ingeniería Medio Ambiental de la Universidad Técnica de Lisboa. Tiene 11 años de experiencia en la aplicación de modelos numéricos en las zonas costeras y embalses, en la adquisición de datos oceanográficos y monitoreo (sondas multiparamétrica, ADCP, CTD etc.). Las actividades más recientes se han enmarcado en cuatro proyectos europeos (efecto de aumento del flujo de las comunidades de peces en el Duero, Tajo, Guadiana y aguas costeras adyacentes), EASY/ EASYCO (modelado operacional de la costa portuguesa) y PORTONOVO (modelado de calidad del agua en puertos europeos) y los proyectos nacionales de seguimiento de emisarios y planes de manejo de aguas residuales de varias empresas (INAG, sensato, SIMTEJO, oeste de agua, madera IGAARH-Tejo, ARH-Aletenjo).

J. Ribeiro, es Licenciado de Ciencias del Mar de la Universidad Lusofona de Humanidades y Tecnologías. Es consultor de la empresa HIDROMOD desde 1997. Sus líneas de investigación son ondas en el océano, Modelamiento numérico de estuarios y aplicación de Sistemas Operacionales de Pronóstico.

J.C. Restrepo, es Ingeniero Ambiental de la Escuela de Ingeniería de Antioquia, Colombia y MSc. en Ciencias de la Tierra de la Universidad Eafit, Colombia. Actualmente es Doctor(c) en Ciencias del Mar de la Universidad del Norte, Colombia. Se ha desempeñado como investigador del Centro Control de Contaminación del Pacífico (CCCP-DIMAR) y el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH-DIMAR). Actualmente es profesor tiempo completo del Departamento de Física de la Universidad del Norte (Barranquilla, Colombia). Sus intereses de investigación se enfocan en el análisis de procesos costeros y fluviales. ORCID: 0000-0001-5696-8625