



Revista Cubana de Meteorología

ISSN: 2664-0880

Instituto de Meteorología

Rodríguez-Pupo, Alejandro; Calzada-Estrada, Amílcar E.; Lobaina-LaÓ, Alexander; Carracedo-Hidalgo, Dayana; Pérez-Perdomo, Dailin

¿Resulta imprescindible la modelación probabilística de derrames de petróleo en la Zona Económica Exclusiva de Cuba?

Revista Cubana de Meteorología, vol. 26, núm. 3, e07, 2020

Instituto de Meteorología

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=701977550006>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

UAEH
redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc

Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

¿Resulta imprescindible la modelación probabilística de derrames de petróleo en la Zona Económica Exclusiva de Cuba?



Is Probabilistic modeling essential in the Exclusive Economic Zone of Cuba?

<http://opn.to/a/7UHs3>

Alejandro Rodríguez-Pupo ^{1*}, Amílcar E. Calzada-Estrada ^{1*}, Alexander Lobaina-LaÓ ², Dayana Carracedo-Hidalgo ¹, Dailin Pérez-Perdomo ¹

¹Centro de Meteorología Marina, Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba.

²Oficina AISMet, Empresa Cubana de Navegación Aérea ECNA, La Habana, Cuba.

RESUMEN: Este artículo muestra un ejercicio de modelación de derrames hipotéticos de hidrocarburos en la porción noroccidental de la Zona Económica Exclusiva de Cuba para señalar al lector la importancia y la necesidad de la modelación probabilística en medio de la compleja dinámica de los sistemas meteorológicos y oceánicos presentes en dicha región, los cuales gobiernan en el movimiento de las manchas de petróleo. Para este ejercicio es empleado el modelo lagrangiano de pronóstico de deriva de petróleo PETROMAR-3D. Se analiza la trayectoria del derrame y su recalco en las costas a través de escenarios de las temporadas invernal y ciclónica respectivamente, además se simula un derrame de un escenario de evento extremo (el huracán Irma). Se introduce un nuevo enfoque, basado en la dirección del movimiento de la mancha en las primeras 24 horas, para el análisis de la relación entre las trayectorias y el recalco de las manchas de hidrocarburos en las costas.

Palabras clave: Modelación de derrames de petróleo, Petromar, modelo lagrangiano, Zona Económica Exclusiva de Cuba.

ABSTRACT: This article shows a modeling exercise of hypothetical oil spills in the northwestern portion of the Exclusive Economic Zone of Cuba to indicate to the reader the importance and the need for probabilistic modeling amid the complex dynamics of the meteorological and oceanic systems present in that region, which governs the movement of oil slicks. The PETROMAR-3D oil drift forecast lagrangian model is used for this exercise. The trajectory of the spill and its fate to the coast are analyzed through winter and cyclonic seasons scenarios respectively, in addition a spill of an extreme event scenario (Hurricane Irma) is simulated. A new approach is introduced, based on the direction of slick movement in the first 24 hours, for the analysis of the relationship between the trajectories and the fate of hydrocarbon slicks to the coasts.

Key words: oil spill modeling, petromar, lagrangian model, Exclusive economic zone of Cuba.

INTRODUCCIÓN

Entre las propuestas para el sector de los negocios y las inversiones extranjeras en la República de Cuba, sobresalen la exploración y producción petrolera en su zona económica exclusiva (ZEE) del Golfo de México. En su porción noroeste, la ZEE de Cuba pertenece a una

mega-cuenca de abundante petróleo que es compartida además por Estados Unidos y México. En un área de jurisdicción cubana de aproximadamente 2000 km², se han hecho perforaciones de exploración que han arrojado como resultado la presencia de petróleo (Felipe, 2016).

*Autores para correspondencia: Alejandro Rodríguez Pupo y Amílcar E. Calzada Estrada. E-mail: alejandro.rodriguez@insmet.cu, amilcar.calzada@insmet.cu

Recibido: 14/09/2019

Aceptado: 20/02/2020

Estudios geológicos realizados en la ZEE de Cuba del Golfo de México muestran que los hidrocarburos de la Isla, comparados con los de México y Estados Unidos, tienen similitudes y una historia geológica común. Una estimación preliminar calcula más de 15 000 millones de barriles de petróleo, por lo que podrían descubrirse grandes yacimientos en esa zona ([Opciones, 2017](#)).

Ante el interés de las compañías internacionales de extracción de petróleo y gas natural, conjuntamente con las facilidades que otorga el gobierno de Cuba para la prospección y extracción de hidrocarburos ([Granma, 2019](#)), se incrementará la producción del preciado combustible con el consecuente aumento del riesgo de accidentes de gran magnitud en la zona. Éstas extracciones que se producen en aguas profundas, tienen aparejado a ellas el peligro de accidentes por condiciones meteorológicas severas; así como explosiones (Blowout, en inglés) en el lecho marino o en las tuberías de extracción del hidrocarburo.

Un ejemplo de lo antes mencionado, lo constituye el accidente más grande de la historia de los derrames de petróleo en el Golfo de México, ocurrido el 20 de abril de 2010 en la plataforma petrolera DeepWater Horizon. Este siniestro cegó la vida a 11 trabajadores, y estuvo vertiendo cerca de 50000 barriles de crudo diario durante casi 3 meses hasta que pudo ser controlado, para un aproximado total de 5 millones de barriles de petróleo. Este devastador accidente constituyó un desastre ecológico sin precedentes en las costas del Golfo de México.

Las pérdidas billonarias en el sector del turismo y la pesca (22 y 2.7 billones de dólares respectivamente) en EE.UU ([Sumaila et al., 2012](#)) hablan por sí solas del impacto económico del siniestro. Por otro lado, el impacto negativo en las colonias de corales de la zona afectada, los cuales necesitarán muchos años para la recuperación y algunas colonias probablemente nunca se recuperarán ([Girard & Fisher, 2018](#)), es muestra de los daños a los ecosistemas marinos. De igual modo, la población costera (dedicada fundamentalmente al turismo, la producción de mariscos y la extracción petrolera) recibió daños

psicológicos considerables al perder sus fuentes de ingreso ([Cope et al., 2013](#)).

El monitoreo de derrames de petróleo se aborda fundamentalmente de dos maneras: 1) mediante los modelos de transporte y destino, donde los parámetros de entrada son determinados a partir de datos sinópticos o mesoescalares según la resolución del dominio y ofrecen información muy útil respecto a su futura trayectoria en un accidente real. 2) A través de la modelación probabilística, que muestra las probabilidades de que los hidrocarburos lleguen a tierra si ocurre un derrame. Estos modelos están orientados a la planificación ante posibles accidentes ([West & Solsberg, 1998](#)). En la actualidad, los modelos probabilísticos se diseñan para modelar la climatología de las trayectorias de derrames hipotéticos en un lugar geográfico determinado a través de las corridas de los modelos de tipo determinista que muestran a donde se dirige el derrame ([Spaulding, 2017](#)).

La modelación probabilística de derrames de petróleo constituye una importante herramienta para analizar posibles escenarios futuros a los que podrían enfrentarse los decisores y los grupos operativos de trabajo tanto en la prospección como en la extracción de crudo en la ZEE al noroeste de Cuba, en aras de poner a punto los planes de contingencias ante posibles accidentes ([CGRT, 2013](#)). Para este propósito, se consideran las variables meteorológicas y oceanográficas en condiciones habituales, o en presencia de eventos extremos como frentes fríos y ciclones tropicales entre otros.

El presente artículo, dada la gran importancia económica que reviste para la República de Cuba la ZEE y los riesgos a que están expuestos los ecosistemas, sectores económicos y la población de sus zonas costeras, expone un ejercicio de trayectorias de derrames de petróleo hipotéticos en la región de la ZEE de Cuba, perteneciente al Golfo de México utilizando un modelo de transporte y destino. El objetivo de este ejercicio es mostrar la alta variabilidad existente en la deriva de petróleo en el mar a través de las diferentes épocas del año, que depende de la dinámica de los sistemas de corriente, viento y oleaje. Así mismo, resaltar la

importancia del estudio de la probabilidad de deriva de derrames de petróleo en el mar como una importante herramienta en la toma de decisiones ante posibles accidentes de derrames de hidrocarburos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Características oceanográficas y meteorológicas generales de la ZEE

La región de estudio de la ZEE en este trabajo se encuentra, al noroeste de la porción occidental de la isla de Cuba y en el extremo oriental del Golfo de México. En la Gaceta Oficial de la República de Cuba de mayo de 2009 ([Ministerio de Justicia, 2009](#)), mediante el decreto ley 266 en su artículo 1, quedó definida la Zona Económica Exclusiva de Cuba en el Golfo de México:

“El límite exterior de la Zona Económica Exclusiva de la Republica de Cuba en el Golfo de México, que está definido por un arco de líneas geodésicas cada punto del cual está a una distancia de 200 millas náuticas, medido desde el punto más próximo del Sistema de Líneas de Base Rectas desde donde se mide la anchura del Mar Territorial cubano”.

No.	LATITUD			LONGITUD		
1.	24°	56'	28°.83	-86°	56'	16°.69
2.	25°	03'	29°.14	-86°	47'	05°.90
3.	25°	07'	52°.92	-86°	41'	07°.08
4.	25°	12'	25°.00	-86°	33'	12°.00

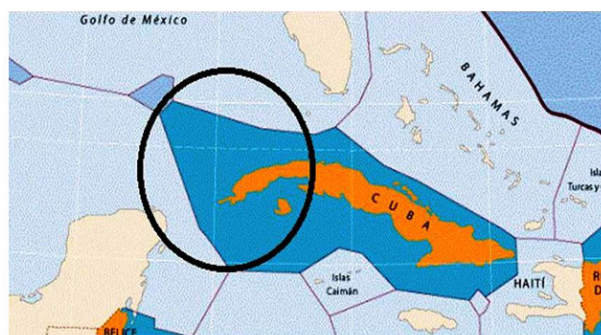


Figura 1. La ZEE de Cuba en su porción del Golfo de México señalada con un círculo.

En esta región, se encuentra el flujo anticiclónico de la Corriente del Lazo, que une a la Corriente de Yucatán y la de La Florida en la parte Este del Golfo.

Asociado con la Corriente de la Florida y la curvatura anticlónica de la Corriente del Lazo, en la entrada oeste del estrecho de la Florida, existe un Vórtice Anticlónico de Mesoescala a lo largo de la costa norte occidental cubana (CubAN, anticiclón cubano siglas en inglés). La dinámica e interacción de los sistemas de corrientes ha sido analizada por autores de la región empleando satélites, derivadores y datos de boyas. Dos tipos de remolinos son caracterizados: una celda anticlónica principal, dentro del núcleo de la Corriente del Lazo como una extensión (tipo A) y un remolino anticiclónico individual que saliendo del propio núcleo es desplazado hacia el este a lo largo de la costa noroccidental cubana (CubAN) (tipo B) ([Kourafalou et al., 2017](#)).

En toda esta relación directa entre los sistemas de corrientes marinas de la zona, se destaca el desplazamiento del CubAN, el cual debilita o refuerza la Contracorriente Cubana, manteniendo ésta un movimiento continuo desde la península de Hicacos hasta el cabo de San Antonio ([Arriaza et al., 2018](#)).

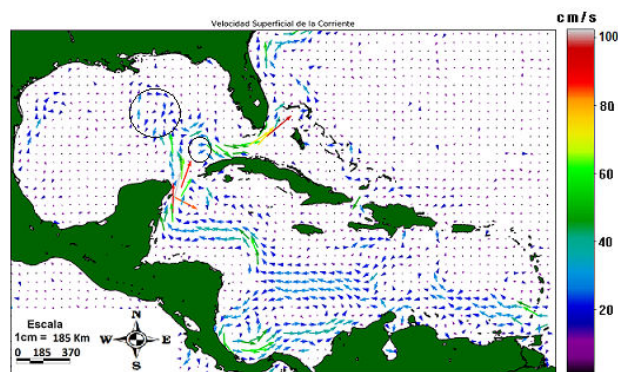


Figura 2. Mapa de corrientes del Mar Caribe y el Golfo de México. Están circulados dos remolinos anticiclónicos, al noroeste el remolino anticiclónico asociado a la Corriente del Lazo; y al sureste, el anticiclón cubano (CubAN).

Por otra parte, el régimen habitual del viento en la zona, al igual que en el resto de la isla, está básicamente bajo la influencia de la circulación de los vientos Alisios con una velocidad media de 2.8 m s⁻¹ según estudios ([Vega et al., 1990](#)), y ([Lecha et al., 1994](#)) citados en artículos más recientes ([Mitrani Arenal et al., 2017](#)). Este régimen normal

en la ZEE de Cuba suele ser alterado por los sistemas tropicales y continentales.

La zona de estudio también es afectada con mucha frecuencia por fenómenos meteorológicos extremos, como sistemas frontales, combinaciones de sistemas extratropicales y huracanes; siendo para estos últimos de particular interés, los valores máximos de los parámetros de la estructura termohalina tales como la temperatura de la superficie del mar y la profundidad de la capa isotérmica, que coinciden con el área más favorable al desarrollo de ciclones tropicales llamada piscina cálida en el argot meteorológico ([Mitrani Arenal et al., 2017](#)).

Por último, esta porción de la ZEE, presenta en la región cercana al occidente de la isla de Cuba una amplia zona de la plataforma insular de profundidad reducida con una costa baja y de pendiente débil, lo cual implica que la sobreelevación del nivel del mar es favorecida en la misma, esta es generada frecuentemente por huracanes y frentes fríos debido a la acción tangencial del viento sobre la superficie del mar, por lo que son factibles las inundaciones costeras en presencia de estos eventos ([Osorio et al., 2001](#)).

Herramientas empleadas en la modelación

La principal herramienta del ejercicio presentado en este trabajo lo constituye la aplicación PETROMAR - 3D (versión 2.1), modelo lagrangiano de transporte y destino, creado en el Centro de Meteorología Marina (CMM) del Instituto de Meteorología de Cuba (INSMET) ([Calzada et al., 2015](#)).

Los modelos proveedores de los datos hidrometeorológicos al modelo PETROMAR-3D empleados en este ejercicio fueron:

Modelo Atmosférico: Weather Research Forecasting (WRF) corrido en el INSMET, el cual tiene en cuenta las características físico-geográficas de Cuba y su posición en la zona central de los mares interamericanos. Se definieron dos dominios anidados en la proyección de Lambert, con coordenadas a 22 ° N y 80 ° W. Este punto es aproximadamente hacia el centro del área, por lo

que el meridiano 80 prácticamente divide la isla por la mitad. El dominio exterior, el cual es usado en la evaluación, cubre los mares interamericanos con un total de 26257 puntos de malla (217x121), con resolución espacial de 18 km ([Mitrani et al., 2019](#)).

Modelo Oceánico: ROMS (Regional Oceanic Modeling System). Modelo numérico tridimensional para la circulación oceánica, descrito por Shchepetkin y McWilliams citado por Mitrani y colaboradores ([Mitrani et al., 2019](#)). Este modelo ha sido especialmente diseñado para mejorar la precisión de las simulaciones en los sistemas oceánicos regionales. En el presente trabajo, se utiliza con resolución espacial de 3 km y temporal de 3 horas.

Modelo de Oleaje: Se eligió el WWIII ([WW3, 2013](#)) como modelo espectral de tercera generación para predecir el oleaje en los mares y océanos, implementado en el CFA. Los parámetros empleados fueron la altura de la ola significativa, la dirección de la ola y el periodo de la ola pico ([Pérez-Bello & Mitrani Arenal, 2013](#)).

Con el modelo lagrangiano PETROMAR-3D, se ejecutaron 250 corridas para analizar la temporada invernal de 2016-2017 y 2017-2018 entre diciembre y marzo; y 250 corridas para las temporadas ciclónicas de junio a noviembre de 2016 y 2017. Las trayectorias de los derrames hipotéticos de petróleo fueron configuradas con los mismos parámetros. Ambos ejercicios simulaban derrames de índole instantáneo de 5000 barriles de un petróleo de 20 grados API (19980.32Kg/m³), con hora de comienzo a las 06:00 UTC (01:00 h local). Se propuso como sitio del derrame las coordenadas (23.2821, -85.180) considerando el derrame como superficial. En toda la modelación fueron considerados los procesos de intemperización, esparcimiento, advección, difusión horizontal e interacción con la línea de costa (en primera aproximación).

Procedimiento para realizar el ejercicio de las trayectorias

Para realizar este ejercicio, se utilizaron los datos del periodo de junio de 2016 hasta marzo de 2018 de los modelos oceánicos y atmosféricos mencionados, separando la temporada invernal de

diciembre a marzo y la temporada ciclónica de junio a noviembre. Una nueva variable es introducida: La dirección del movimiento del centro de masa de la mancha en las primeras 24 horas, la cual se mide entre las coordenadas iniciales del accidente simulado y su posición a las 24 horas. En una zona caracterizada por varias circulaciones de remolinos ciclónicos y anticiclónicos, resulta interesante estudiar si existe relación entre el movimiento inicial de la mancha de petróleo y su destino final.

En total se hicieron 500 corridas de 10 días, aunque no se usaron todas las posibles en el periodo por problemas de discontinuidad en los datos. De esta manera, se agruparon todos los datos de dirección del movimiento en 24 horas del centro de masa de la mancha, obteniéndose una caracterización de esta variable por temporada. Al efectuar las corridas, se contaron las trayectorias con recalo en las costas de Cuba por temporada, el tiempo de duración del arribo, así como los sectores de la costa más afectados.

Por último, se relacionó el arribo o no a la costa, los lugares y el tiempo de arribo con la dirección del movimiento del centro de masa de la mancha en las primeras 24 horas. Además, se analizaron los casos atípicos de recalo de la mancha de petróleo en la costa y se valoró la situación sinóptica que ocurría en esa fecha en el lugar.

ANÁLISIS Y RESULTADOS

El ejercicio realizado con la población de datos seleccionada mostró una diferencia notable en el comportamiento de las trayectorias de las derivas de petróleo pertenecientes a la temporada invernal respecto a las de la temporada ciclónica lo que corrobora los estudios de Kourafalou ([Kourafalou et al., 2017](#)) y de Arriaza ([Arriaza, 2018](#)) acerca de los movimientos de los remolinos anticiclónicos como la Corriente del Lazo y el CubAN en las diferentes temporadas del año.

En el caso de la temporada invernal, las direcciones de la deriva del hidrocarburo en las primeras 24 horas que predominaron fueron las del primer y cuarto cuadrante, más exactamente entre el nortenoroeste (NNW) y el noreste (NE) con trayectorias que bordearon el CubAN anticiclónico

situado al norte occidental de la isla de Cuba. Así mismo, se puso en evidencia en esta etapa, que entre la segunda quincena de diciembre y la primera de enero se produjeron las derivas que recalaron en la costa, con el 28,8 % de los casos del total. Los sectores más afectados fueron los de las provincias de Artemisa, La Habana y Mayabeque; relacionándose éstos con la dirección de deriva de las primeras 24 horas del norte noroeste (NNW), con un tiempo de arribo a la costa entre 6 y 8 días.

Tabla 1. Distribución de frecuencias de la dirección de la mancha en las primeras 24 horas en la temporada invernal.

Rumbo24h	No. Casos	%	Costa
N	15	6	
NNE	43	17,2	
ENE	11	4,4	
NE	88	35,2	
NNW	72	28,8	x
SSW	10	4	
SE	11	4,4	

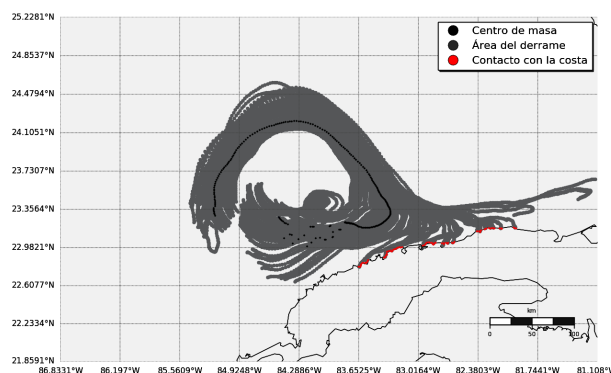


Figura 3. Corrida del modelo PETROMAR-3D del 30 de diciembre de 2016.

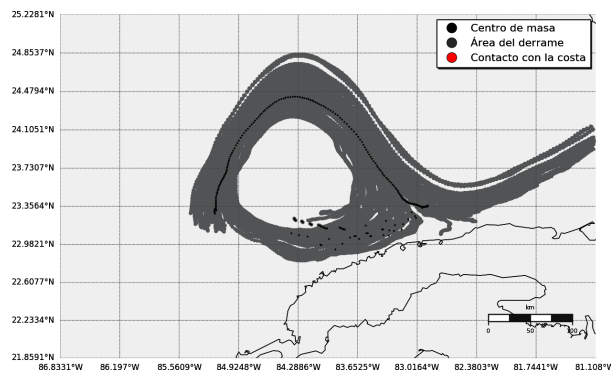


Figura 4. Corrida del modelo PETROMAR-3D del 2 de enero de 2017.

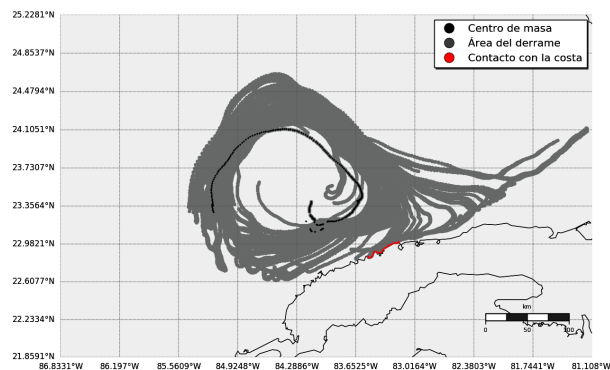


Figura 5. Corrida del modelo PETROMAR-3D del 29 de enero de 2017.

En la temporada ciclónica, la dirección de la deriva de petróleo en las primeras 24 horas se ubicó en el primer, segundo y tercer cuadrante (entre el nortnoreste y el oeste), siendo las trayectorias de la mancha de hidrocarburos que recalaban en la costa entre junio y agosto las que tenían una dirección de deriva del sureste para el 12,4 % de los casos del total.

Tabla 2. Distribución de frecuencias de la dirección de la mancha en las primeras 24 horas en la temporada ciclónica.

Rumbo24h	No. Casos	%	Costa
N	28	11,2	
NNE	20	8	
NE	28	11,2	
ENE	15	6	
E	6	2,4	
ESE	6	2,4	
SE	31	12,4	x
SSE	10	4	
S	11	4,4	
SSW	9	3,6	
SW	25	10	
WSW	8	3,2	
W	25	10	
WNW	18	7,2	
NW	10	4	

Como se ha estudiado por varios investigadores, en la temporada ciclónica, la Corriente del Lazo penetra más profundamente en el Golfo de México y el CubAN se corre hacia el oeste propiciando que la mancha de petróleo pueda ser atrapada por el remolino ciclónico que se forma al este del CubAN. Esto justifica el resultado de menor

número de casos del total en el arribo de la mancha de petróleo a la costa comparado con la temporada invernal.

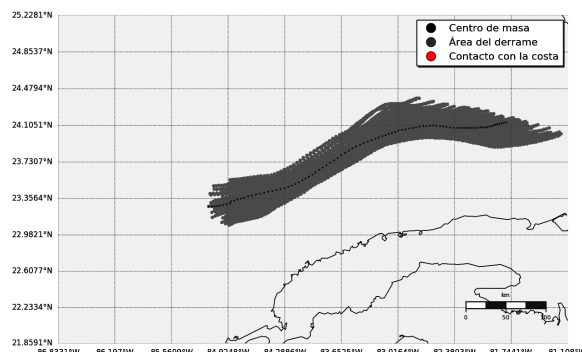


Figura 6. Corrida del modelo PETROMAR-3D del 5 de agosto de 2017.

En el mes de septiembre de ambas temporadas, la dirección de la deriva de petróleo que predomina en las primeras 24 horas son suroeste y oeste, pero ocurrieron 4 trayectorias entre el 6 y 10 de septiembre de 2017 que recalaban en la costa de 2 a 3 días; coincidiendo con el paso del Huracán Irma por el norte de las provincias centrales de Cuba y produciendo vientos muy fuertes de componente norte y noroeste capaces de alterar la circulación marina sobre la locación geográfica escogida para el ejercicio.

La presencia de un huracán intenso con vientos de componente noroeste (NW) durante un derrame de petróleo conduce a aumentar los índices de dispersión del contaminante, la mancha se traslada velozmente hacia las costas de Cuba, como consecuencia de los fuertes vientos, que son del cuarto cuadrante (WNW aproximadamente).

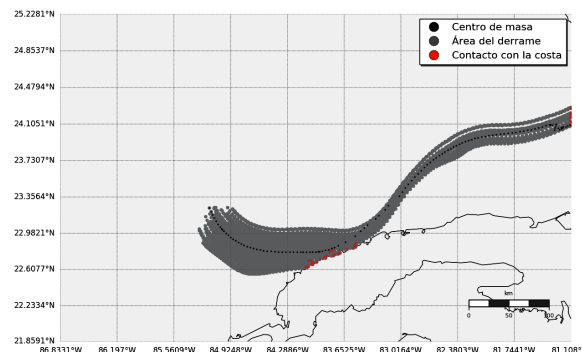


Figura 7. Corrida del modelo PETROMAR-3D del 4 de septiembre de 2017, con el Huracán Irma ubicado al norte del centro de la isla.

En los meses de octubre y noviembre, al final de la temporada ciclónica, se aprecia que la dirección de la deriva de petróleo en 24 horas, se trasladó hacia el primer cuadrante (noreste y norte). Este movimiento hace que el recalco de las manchas de petróleo en las costas de Cuba, sea poco probable.

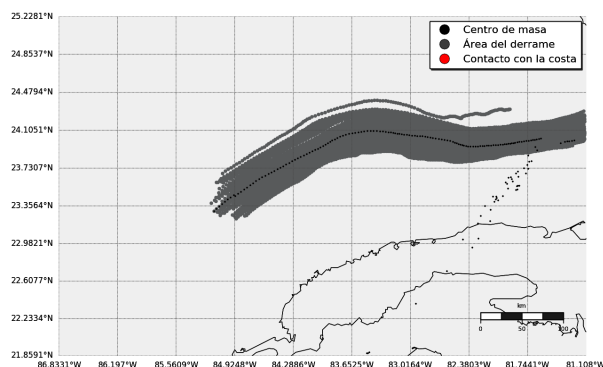


Figura 8. Corrida del modelo PETROMAR-3D del 15 de octubre de 2016.

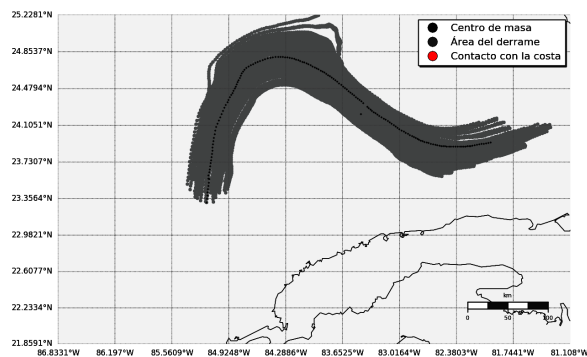


Figura 9. Corrida del modelo PETROMAR-3D del 19 de noviembre de 2016.

DISCUSIÓN

Las 500 corridas efectuadas con el modelo PETROMAR-3D en el punto inicial fijado dan una ilustración de la alta estacionalidad de la probabilidad de ocurrencia de afectaciones en las costas de Cuba, situando la temporada invernal como la de mayor peligro en caso de accidente de derrame de hidrocarburos con un 28,8 %; mientras que en la temporada ciclónica (con ausencia de organismo tropical) es de 12,4 %. Estos valores están bien cerca de los valores calculados por Drouin ([Drouin et al., 2019](#)).

En un estudio de simulaciones de 10 días en varios puntos del Golfo de México y el estrecho de la Florida, Drouin obtuvo hasta un 28 % de probabilidad de impacto en las costas de Cuba en invierno; y de hasta un 16 % en verano. De igual forma la cantidad de días empleados, para la mancha de hidrocarburos en arribar a las costas de Cuba, por este autor es de hasta 8 días que coincide con la modelación efectuada con PETROMAR-3D.

En cuanto al comportamiento de la trayectoria del centro de masa de la mancha del modelo lagrangiano de deriva PETROMAR-3D, se puede percibir que no se trata de una línea continua, sino de puntos calculados y representados con color negro, considerando la distribución de partículas virtuales en que se descompone el contaminante. Estos cálculos tienen un sentido práctico antes de cualquier recalco a un sector costero o a la salida de alguna partícula por la frontera abierta. Una vez que estos sucesos ocurren, rápidamente la ubicación del próximo punto será distante a las anteriores, pues al menos una de las partículas se detuvo. Estos cambios presentan una gran utilidad en la interpretación de los resultados porque muestra las dimensiones de los impactos de la mancha con las referidas fronteras. En las figuras anteriores, excepto la 6 y la 9, se experimenta el suceso del que se hace mención.

En la [figura 3](#) existe un recalco casi al final del escenario y en los instantes iniciales la mancha se estabiliza, mostrándose en la propia trayectoria. En la 4 no hay recalco, pero sí una fuga por la frontera abierta del Este. En la 7 existe un recalco muy ligero a mediados del escenario (no se desvió la trayectoria prácticamente) pero se evidencia que en los finales del movimiento la cantidad que comienza a fugarse es más importante, reflejándose en el descenso de los puntos del centro de masa. El mismo suceso ocurre en la [figura 8](#) con más intensidad, considerando la desviación más brusca de la trayectoria.

CONCLUSIONES

El ejercicio realizado muestra la importancia de conocer previamente el comportamiento que puede tener la deriva de una mancha de petróleo en un punto inicial de la región noroccidental de la ZEE de Cuba, dejando por sentado la estrecha relación entre el movimiento de una mancha de petróleo en el mar y las condiciones ambientales imperantes en el lugar.

Al analizar las corridas efectuadas en la modelación, se puede apreciar que la temporada invernal es la que tiene mayor peligro de recalo de la mancha de petróleo en las costas de Cuba, de producirse un derrame.

Con la observación, en el sitio elegido para el ejercicio, de la relación entre la dirección del movimiento del centro de masa de la mancha y el arribo (o no) a la costa, se pueden identificar las direcciones más peligrosas del movimiento del contaminante en las primeras 24 horas; lo cual resulta un indicio de gran valor para los tomadores de decisiones, ante los planes de contingencias por accidentes de derrames de petróleo en la ZEE.

Mediante el caso particular del Huracán Irma, se aprecia el movimiento a gran velocidad de la mancha y su pronto recalo en las costas ante este evento meteorológico extremo. Este análisis cobra gran importancia ante las fases impuestas por la defensa civil de Cuba en condiciones de huracán; máxime si ocurre un derrame de petróleo al mismo tiempo. Por ese motivo, resulta muy conveniente tener el análisis de estos mapas previamente.

Con este ejercicio queda evidenciado que el uso de la modelación probabilística en la prospección y extracción petrolera en la ZEE de Cuba resulta una herramienta imprescindible en la toma de decisiones ante catástrofes de derrames de petróleo en el mar.

RECOMENDACIONES

Se hace necesario que el CMM del INSMET haga extensivo este procedimiento para cualquier sitio de derrame y promueva el diseño de un modelo probabilístico de derrames de hidrocarburos listo para hacer estudios en cualquier zona de la región.

Así mismo, se debe profundizar en el estudio de la relación entre la dirección del movimiento del centro de masa de la mancha en 24 horas y el arribo o no a la costa, el tiempo de arribo y los sectores costeros afectados.

REFERENCIAS

- Arriaza, L. 2018. "Conectividad dinámica en las aguas oceánicas alrededor de Cuba: La contracorriente cubana entre Cabo de San Antonio y península de Icacós". In: *MarCuba 2018*, La Habana: CITMATEL, Available: <<http://www.congresomarcuba.com/programa-cientifico.pdf>>.
- Arriaza, L.; Ochoa, J. L.; Bolívar, C.; Álvarez, C.; Wilson, D.; Hernández, M.; Navarro, J.; Trincado, J.; Carrillo, Y.; Arlen, C.; Benítez, L. & López, Y. 2018. *Resumen ejecutivo del proyecto "Variabilidad de la circulación oceánica y conectividad dinámica en el canal de Yucatán, el estrecho de La Florida y el Canal Viejo de Bahamas" del programa "Cambio climático en Cuba: impactos, mitigación y adaptación"*.
- Calzada, A.; Pérez, F.; Reyes, D. & Casals, R. 2015. "Modelación de los derrames de petróleo mediante el empleo de PETROMAR". *Revista Cubana de Meteorología*, 21(No. 2): 57-69.
- CGRT. 2013. *Términos de referencia para la elaboración del plan de contingencia para el manejo de derrames de hidrocarburos o sustancias nocivas*. Available: <<http://www.corantioquia.gov.co/SiteAssets/PDF/Gesti%C3%B3n%20ambiental/Residuos/Peligrosos/Cartillas/Terminos%20de%20referencia-Planes%20contingencia%20derrames%20hidrocarburos.pdf>>.
- Cope, M. R.; Slack, T.; Blanchard, T. C. & Lee, M. R. 2013. "Does time heal all wounds? Community attachment, natural resource employment, and health impacts in the wake of the BP Deepwater Horizon disaster". *Social Science Research*, 42(3): 872-881, ISSN: 0049-089X, DOI: 10.1016/j.ssresearch.2012.12.011.
- Drouin, K. L.; Mariano, A. J.; Ryan, E. H. & Laurindo, L. C. 2019. "Lagrangian simulation of oil trajectories in the Florida Straits". *Marine Pollution Bulletin*, 140: 204-218, ISSN: 0025-326X, DOI: 10.1016/j.marpolbul.2019.01.031.
- Felipe, K. 2016. *La ruta del petróleo en Cuba (Primera Parte)*. Granma.cu, Available: <<http://www.granma.cu/cuba/2016-09-30/la-ruta-del-petroleo-en-cuba-primera-parte-30-09-2016-13-09-41>>.

- Girard, F. & Fisher, C. R. 2018. "Long-term impact of the Deepwater Horizon oil spill on deep-sea corals detected after seven years of monitoring". *Biological Conservation*, 225: 117-127, ISSN: 0006-3207, DOI: 10.1016/j.biocon.2018.06.028.
- Granma, R. D. 2019. *Presentan en Londres potencial petrolero equivalente a más de seis mil millones de barriles*. Granma.cu, Available: <<http://www.granma.cu/cuba/2019-06-04/presentan-en-londres-potencial-petrolero-del-mariel-equivalente-a-mas-seis-mil-millones-de-barriles-04-06-2019-10-06-12>>, [Consulted: August 2, 2019].
- Kourafalou, V.; Androulidakis, Y.; Le Hénaff, M. & Kang, H. 2017. "The Dynamics of Cuba Anticyclones (CubANs) and Interaction With the Loop Current/Florida Current System: DYNAMICS OF CUBA ANTICYCLONES (CubANs)". *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(10): 7897-7923, ISSN: 2169-9275, DOI: 10.1002/2017JC012928.
- Lecha, L.; Paz, L. R. & Lapinel 1994. *El Clima de Cuba*. La Habana: Academia, ISBN: 959-02-006-0.
- Ministerio de Justicia 2009. "DECRETO-LEY No. 266 DEL LIMITE EXTERIOR DE LA ZONA ECONOMICA EXCLUSIVA DE LA REPUBLICA DE CUBA EN EL GOLFO DE MEXICO". *Gaceta Oficial de la Republica de Cuba*, May, Especial ed., La Habana, Cuba, ISSN: 682-7511, Available: <<http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/cub91245.pdf>>.
- Mitrani Arenal, I.; Vichot Llamó, A.; Díaz Rodríguez, O. O.; Cabrales Infante, J. & Bezanilla Morlot, A. 2017. *Parámetros oceanográficos en las aguas cubanas y posible evolución futura*. Editora Geotech, ISBN: 978-959-7167-60-0, Available: <<http://repositorio.geotech.cu/jspui/handle/1234/2320>>, [Consulted: July 5, 2019].
- Mitrani, I.; Perez, A.; Cabrales, J.; Povea, Y.; Hernández, M. & Diaz, O. O. 2019. "Coastal flood forecast in Cuba, due to hurricanes, using a combination of numerical models". *Revista Cubana de Meteorología*, Vol. 25(No. 2): 18, ISSN: 0864-151X.
- Opciones. 2017. *Nuevas perspectivas de la producción petrolera cubana - Cuba - Opciones - Semanario económico y financiero de Cuba*. Available: <<http://www.opciones.cu/cuba/2017-03-14/nuevas-perspectivas-de-la-produccion-petrolera-cubana/>>.
- Osorio, P. J. P.; Taylor, R. C. & Díaz, A. S. 2001. "Características sinópticas y estado de la mar en las costas de Península de Guanahacabibes". *Revista Cubana de Meteorología*, 8(1), ISSN: 2664-0880, Available: <<http://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/article/view/356>>, [Consulted: August 3, 2019].
- Pérez-Bello, A. & Mitrani Arenal, I. 2013. "Pronóstico numérico del oleaje en mares interamericanos y costas - Free Download PDF". *Ciencias de la Tierra y el Espacio*, 14: 14-24, ISSN: 1729-3790.
- Spaulding, M. L. 2017. "State of the art review and future directions in oil spill modeling". *Marine Pollution Bulletin*, 115(1): 7-19, ISSN: 0025-326X, DOI: 10.1016/j.marpolbul.2017.01.001.
- Sumaila, U. R.; Cisneros-Montemayor, A. M.; Dyck, A.; Huang, L.; Cheung, W.; Jacquet, J.; Kleisner, K.; Lam, V.; McCrea-Strub, A.; Swartz, W.; Watson, R.; Zeller, D. & Pauly, D. 2012. "Impact of the Deepwater Horizon well blowout on the economics of US Gulf fisheries". *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 69(3): 499-510, ISSN: 0706-652X, DOI: 10.1139/f2011-171.
- Vega, R.; Sardiñas, E.; Nieves, M. E. & Centella, A. 1990. *Análisis estadístico - climatológico del régimen de la velocidad máxima del viento en Cuba*. La Habana: Instituto de Meteorología de Cuba.
- West, M. & Solsberg, L. 1998. *Modelado de Trayectorias de Derrames de Hidrocarburos*. Informe Ambiental, no. No. 4, ARPEL.
- WW3. 2013. *Environmental Modeling Center*. Available: <<http://polar.ncep.noaa.gov/waves/>>.

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

Los autores de este trabajo declaran presentar una participación igualitaria en la concepción, ejecución y escritura de la investigación.

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)