

An offshore oil rig is silhouetted against a vibrant sunset sky with orange and blue tones. The rig features several cranes and complex piping structures. The foreground shows the dark, choppy surface of the ocean with white-capped waves.

Matemáticas contra el petróleo

Los modelos numéricos pueden ayudar a prevenir desastres de petróleo en el mar. La investigadora Andrea Devis de la Universidad del Rosario plantea los desafíos que deben superarse para predecir el comportamiento de los derrames de crudo tan pronto ocurran, para mitigar su impacto negativo.

Por Amira Abultaif Kadamani

Fotos Ximena Serrano, Freepik.es

DOI https://doi.org/10.12804/dvncn_10336.47607_num8



Cuando ocurren derrames de petróleo y el viento arrecia cada segundo cuenta. Bien sean derrames pequeños, como fugas durante el reabastecimiento o en tanques de transporte, o bien, grandes derrames causados por colisiones, fallas en tuberías o plataformas, las consecuencias sobre los ecosistemas marinos, las economías nacionales y el tejido social pueden perdurar durante años. En esos momentos, las matemáticas pueden marcar la diferencia entre un desastre y la respuesta oportuna a una contingencia.

En el Golfo de Morrosquillo, frente a las costas del Caribe colombiano, un par de accidentes ocurridos a mediados de 2014 durante una carga de crudo en el puerto de Coveñas convirtieron unas decenas de barriles de petróleo en una marea negra que amenazó corales, manglares, comunidades pesqueras y el turismo regional.

↑
Para comunidades costeras que viven de la pesca artesanal y el turismo, un derrame representa no solo un daño ecológico sino una crisis económica inmediata.

Episodio 1

Día: 20 de julio de 2014

Hora: 20:30

Locación: 9.493 ° Norte, 75.776 ° Oeste, Puerto de Coveñas, Colombia

Operación: carga de hidrocarburos en el buque BT Eurochampion, por parte de Oleoducto Central SA (Ocesa)

Falla: tensión abrupta y repentina en los mecanismos de amarre del buque tanque que provocó la fuga del crudo que se encontraba dentro de una de las mangueras de transferencia.

Consecuencia: escape de unos 69 barriles de hidrocarburos al mar

Episodio 2

Día: 21 de agosto de 2014

Hora: 22:00

Locación: 9.496 ° Norte; 75.737 ° Oeste, Puerto de Coveñas, Colombia

Operación: carga de hidrocarburos en el buque Energy Challenger, por parte de Ecopetrol

Falla: fisura en el sistema de agua de lastre que también contiene hidrocarburos

Consecuencia: escape de unos 50 barriles de hidrocarburos al mar

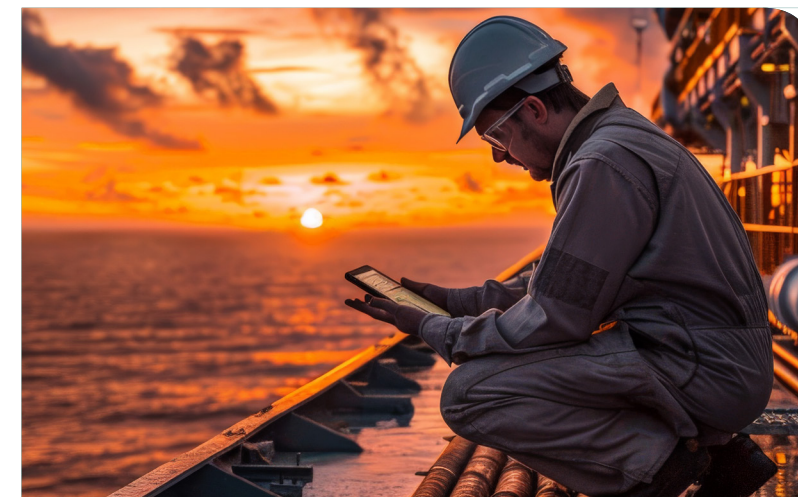
Estos no fueron los únicos incidentes registrados en el Golfo de Morrosquillo entre 1992 y 2021 (hay reporte de nueve accidentes), pero sí fueron las más documentados, por lo cual, los oceanógrafos [Andrea Devis](#) y [Efraín Rodríguez](#) junto con el micropaleontólogo [Daniel Rincón](#) pudieron hacer una simulación de los desastres ocasionados y su eventual contención.

A continuación, su sugerencia. Modelar matemáticamente el comportamiento de un proceso natural (comportamiento de una mancha de petróleo en el mar), mediante una serie de ecuaciones que se resuelven por computador, para evaluar qué tan asertivo es el modelo implementado con respecto de lo ocurrido en la vida real y, ante emergencias futuras, poderlo usar en la prevención y mitigación de siniestros marinos ocasionados por hidrocarburos.

Los investigadores utilizaron OpenOil, un modelo de código abierto desarrollado por la Oficina Meteorológica de Noruega ([MET Norway](#), en inglés), una institución que lo usa para propósitos operacionales de contingencia, búsqueda y rescate. Su naturaleza de acceso libre permite ser usado por cualquier entidad, bien sean empresas petroleras, capitánías de puerto o autoridades marítimas.

Para que funcione, este software combina una serie de variables de entrada (*inputs*) para arrojar unas salidas (*outputs*) que configuran distintos escenarios de desenlace. La clave está en nutrir el sistema con múltiples datos, tanto meteorológicos y oceánicos como de características de la emergencia: temperatura y salinidad del agua, velocidad y dirección del viento, corrientes marinas, batimetría (características del relieve submarino de una zona particular), tipo de hidrocarburo (composición, viscosidad y densidad), volumen derramado, ubicación precisa del incidente y profundidad, entre otros. La cantidad y calidad de estos datos es directamente proporcional a los resultados. Con esa información, el programa puede simular el desplazamiento de la mancha hora a hora, predecir su forma, densidad y hasta los cambios químicos del hidrocarburo en el tiempo.

En el estudio adelantado en el Golfo de Morrosquillo y financiado por Ecopetrol, Devis, Rodríguez y Rincón emplearon datos de análisis global de alta calidad de instituciones tales, como el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo ([ECMWF](#)) para el viento ([ERA-5](#)), y el Servicio de Monitoreo Ambiental Marino de Copérnico ([CMEMS](#)) para las corrientes oceánicas y el oleaje ([WAVERYS](#)).



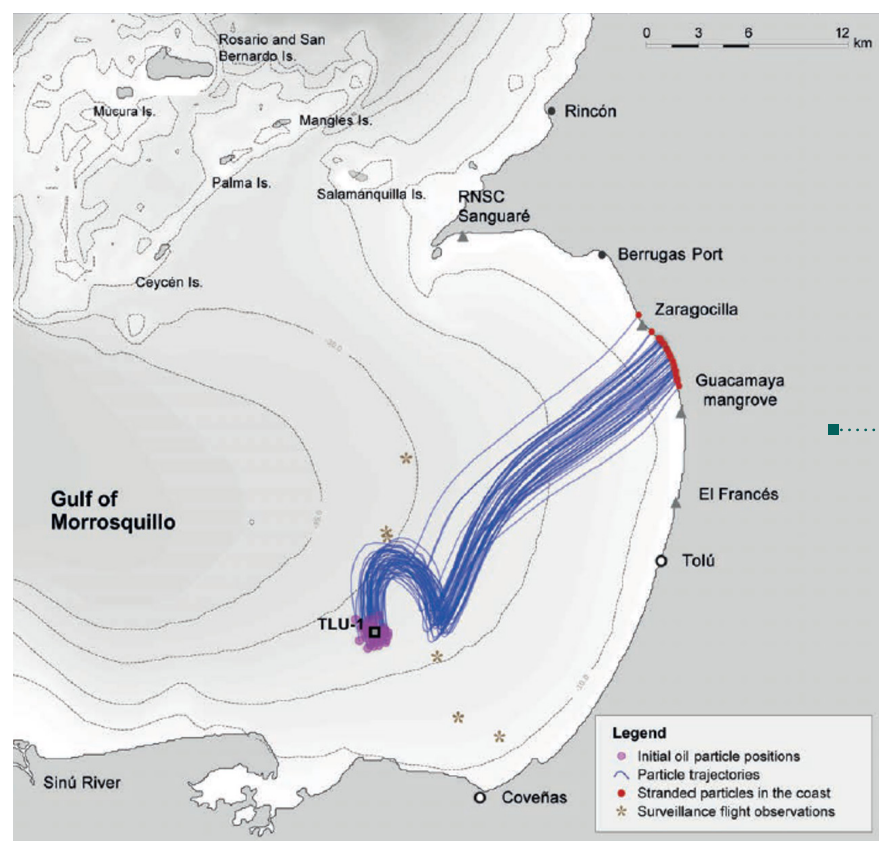
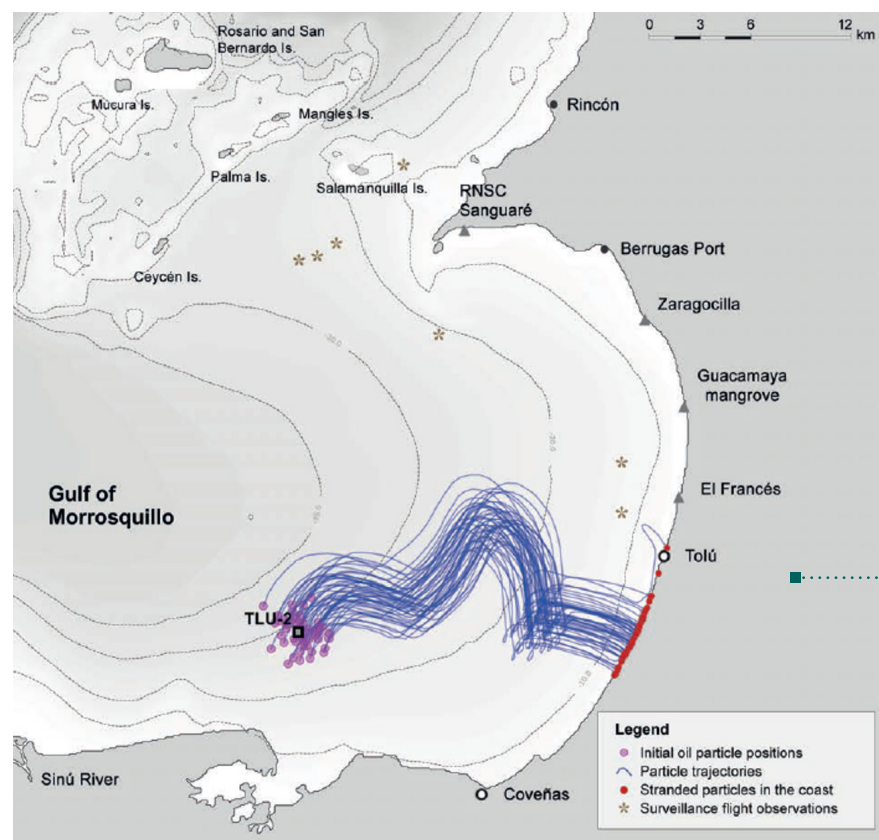
“Sin información en tiempo real, no hay predicción confiable del comportamiento de derrames”

La modelación matemática de derrames de petróleo en el mar, requiere mucho más que buenos algoritmos, porque depende críticamente de pronósticos hidrodinámicos, atmosféricos y oceánicos precisos y, en tiempo real. El oceanógrafo y matemático [Serguei Lonin](#) subraya que el problema central no es el modelo de derrame, sino la obtención de datos básicos, detallados y veraces para nutrirlo.

“Para lograr predicciones confiables se requiere un modelo atmosférico y uno oceánico acoplados y de muy alta resolución espacial”, explica Lonin, quien durante diez años fue asesor científico del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas de la Dirección General Marítima (Dimar), en Colombia. “En 1994, yo trabajaba en la Academia de Ciencias en Ucrania y, la Dimar me invitó a Colombia precisamente, para hacer modelos de predicción de manchas de hidrocarburo en la Bahía de Cartagena, el Golfo de Morrosquillo y en Pozos Colorados, Santa Marta”, agrega él, actual director del Grupo de Investigación en Oceanología de la Escuela Naval Almirante Padilla.

Lonin advierte que los sistemas globales, como el europeo [Copernicus](#), trabajan con resoluciones de 9 a 27 Km, cuando para captar fenómenos breves pero determinantes, como los vendavales (muy frecuentes en la costa Caribe y que suelen alterar el rumbo de una mancha de crudo), se necesitan escalas de apenas 100 m. Sin esa información detallada, los modelos solo ofrecen simulaciones aproximadas o resultados fallidos que no coinciden con las trayectorias que se observan.

Sobre el papel de la inteligencia artificial (IA), el oceanógrafo reconoce que su potencial es enorme, pero aun limitado por la escasez de datos confiables. “Las redes neuronales”, explica, “aprenden a partir de ejemplos y, en Colombia, los registros de derrames son pocos y demasiado diversos. La estrategia, entonces, consiste en fortalecer primero los programas determinísticos (como OpenOil), para generar millones de escenarios hipotéticos que sirvan como base de aprendizaje a los sistemas de IA”. Cuando eso ocurra, la IA podrá ofrecer pronósticos en segundos, aunque siempre, dentro de márgenes probabilísticos. En tanto, la prioridad sigue siendo garantizar una **observación meteoceánica continua, 24/7**, con estaciones locales acopladas a modelos de alta resolución. “Solo así”, concluye Lonin, “podrá predecirse con realismo el comportamiento de un derrame y mitigar su impacto antes de que alcance la costa”.



Una vez se ingresaron los datos, el modelo simuló y entregó el resultado que incluyó hacia dónde se movió la mancha de crudo (transporte o advección), además de los complejos procesos de envejecimiento que cambian sus propiedades físicas y químicas, a sabiendas de que el destino del crudo derramado depende de la interacción de factores físicos (corrientes, oleaje, viento), químicos (oxidación) y biológicos (biodegradación).

En el primer episodio, los investigadores advirtieron que “la trayectoria resultante difiere de la observada por las autoridades locales durante los vuelos de vigilancia del 21 de julio. Según los informes del modelo, durante las primeras 24 horas del incidente, la mancha de petróleo se desplazó al norte, alcanzando las aguas circundantes al sur de la Isla Palma antes de que la advección siguiera al sureste, hacia la costa cerca del sector de El Francés”.

En su artículo científico titulado *Modelación numérica de derrames de petróleo en el Golfo de Morrosquillo, Caribe colombiano* y publicado en la revista *Ciencia, Tecnología y Futuro*, los autores establecieron que, “las diferencias encontradas entre las observaciones aéreas y la simulación podrían estar relacionadas con la resolución horizontal del viento y el oleaje (los campos de forzamiento)”. En otras palabras: si los datos (en este caso de viento y oleaje) se toman cada 50 o 100 Km de distancia, tienen una “resolución” muy baja porque cubren una zona muy amplia. De ahí que cuanto más detallados y sectorizados sean, mayor nitidez y solidez tendrán los resultados. “Además, los vientos podrían estar subestimados en esta zona”, añade el informe.

Episodio 1. El derrame de crudo del 20 de julio ocurrió donde están los puntos morados y la mayoría se desplazó hacia el norte (estrellas amarillas), en cercanías de Isla Palma. En contraste, la simulación, representada por las líneas azules, condujo la mancha hacia Tolu.

Para el segundo episodio, el modelo se aproximó más a lo que se pudo observar: “parte de las trayectorias simuladas coinciden con los informes de las autoridades locales que monitorearon la mancha de petróleo desde aeronaves el 22 de agosto, y con la información del sector turístico que observó la contaminación de las playas el 23 de agosto”, aseguraron los investigadores, para quienes las razones de las discrepancias entre la simulación y lo sucedido son las mismas de la primera contingencia.

Episodio 2. El derrame de crudo del 21 de agosto ocurrió donde están los puntos morados y se desplazó hacia la costa central del golfo hasta arribar al sector de El Francés y las playas de Guacamaya y Zaragocilla. En este caso, el modelo simulado, representado por las líneas azules, tuvo una mejor aproximación a lo ocurrido.

El modelo demostró, por ejemplo: la forma como la combinación de vientos fuertes y altas temperaturas acelera la evaporación del crudo, mientras el oleaje favorece la emulsificación, un proceso en el cual, el petróleo se mezcla con agua y forma una sustancia espesa conocida como “mousse de chocolate”.

En ambos accidentes, las fugas de crudo (de referencia *Vasconia*, nombre de la estación que las recoge en Puerto Boyacá), terminaron por afectar las playas del golfo, donde

Cuando ocurren derrames pequeños, grandes derrames, fallas en tuberías o plataformas, las consecuencias sobre los ecosistemas marinos, las economías nacionales y el tejido social pueden perdurar durante años.

se encontraron bolas de alquitrán producto del envejecimiento del hidrocarburo, porque cuando este se sumerge, entra en contacto con la arena y el sedimento del lecho marino y forma esta especie de nódulo negro que, aunque es más fácil de recoger que el líquido disperso en el agua, delata la reacción tardía al atender la emergencia.

“Este trabajo entrega una herramienta preventiva que sirve también, para reacción rápida”, afirma Devis. “Si mañana ocurre un derrame, el modelo puede decirnos en una hora, hacia dónde se moverá el crudo y cuáles zonas se deben cerrar o proteger primero, siempre y cuando, los actores involucrados en el manejo de hidrocarburos tengan estos sistemas instalados”, añade, recalando la importancia de que las autoridades marítimas y las compañías petroleras tengan información *meteoceánica* (meteorología y oceanografía) para evaluar riesgos marinos y costeros.

Un riesgo real para el Caribe

Aunque en Colombia, todavía no se extrae petróleo en alta mar (offshore), el riesgo de que esto ocurra es latente. Los terminales marítimos donde se cargan los buques petroleros (Coveñas o Cartagena), concentran una intensa actividad de transferencia de crudo.

La región del Caribe está catalogada como una zona de **riesgo elevado de contaminación por hidrocarburos**, debido al tráfico intenso de petroleros y barcos cisterna (que suministran combustible a otras embarcaciones en tránsito). No en vano, el **83 % del mar Caribe** tiene esta amenaza, especialmente, el corredor marítimo de Colombia a Jamaica, que conecta el país con las rutas internacionales de hidrocarburos.

Para comunidades costeras que viven de la pesca artesanal y el turismo, un derrame representa no solo un daño ecológico sino una crisis económica inmediata. “Cuando esas bolas de alquitrán llegaron a las playas, hubo cierres, pérdidas de empleo y afectaciones sociales graves”, recuerda Devis. “Y lo más preocupante es que la reacción fue tardía: si hubiéramos tenido un modelo operativo, probablemente esas manchas no habrían tocado la costa”.

De los algoritmos a la acción

Devis insiste en que la Dirección General Marítima (*Dimar*) y todas las petroleras con proyección hacia el mar, deberían tener oficinas de meteoceánica, implementar estas herramientas matemáticas para evaluar riesgos marinos y costeros, y entregar esa información a las capitanías de puerto, tal como se hace con los pronósticos meteorológicos.

“La tecnología está disponible, pero falta voluntad y coordinación institucional”, sostiene Devis. “Estos modelos pueden salvar ecosistemas y recursos, cuando se usan antes de que



↑
Andrea Devis Morales, investigadora de la Escuela de Ciencias e Ingeniería de la Universidad del Rosario, afirma: “Si mañana ocurre un derrame, el modelo puede decirnos en una hora, hacia dónde se moverá el crudo y cuáles zonas se deben cerrar o proteger primero, siempre y cuando, los actores involucrados en el manejo de hidrocarburos tengan estos sistemas instalados”, añade, recalando la importancia de que las autoridades marítimas y las compañías petroleras tengan información meteoceánica (meteorología y oceanografía) para evaluar riesgos marinos y costeros.

ocurra el desastre. Las compañías internacionales no aplican estos modelos en Colombia, simplemente, porque no se les exige hacerlo”.

El ejemplo de otros países respalda esa visión: la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos (NOAA) opera el sistema *GNOME* que se utiliza para predecir trayectorias de derrames y apoyar decisiones de respuesta. De manera similar, la Oficina Meteorológica Noruega corre *OpenDrift* cada día, para prevenir y mitigar accidentes en el Mar del Norte.

El mar es dinámico y no da espera. “Colombia está muy atrasada en regulación de temas marinos. De hecho, hasta hace poco, salieron los términos de referencia para los estudios de impacto ambiental de las operaciones *offshore* del sector de hidrocarburos, en las cuales, sí es mandatorio aplicar estos sistemas de modelamiento matemático”, concluye la oceanógrafa. Entender el mar es imperioso, pero cuidarlo lo es mucho más. ■