

Alves de Paula, L.; Araujo Ferreira, V.; Eyji Sano, E. Sistema integrado de detección y alerta de riesgo de derrames de petróleo en la Zona Económica Exclusiva brasileña

Sistema integrado de detección y alerta de riesgo de derrames de petróleo en la Zona Económica Exclusiva brasileña

Alves de Paula, Lourenço^{1,2} Araujo Ferreira, Victor Vinicius³ Eyji Sano, Edson^{1,4}

¹ Universidade de Brasília, Distrito Federal, Brasil

² Rede de Modelagem Oceanográfica Observacional, Centro de Hidrografia da Marinha, Marinha do Brasil, Niterói, Rio de Janeiro, Brasil

³ Rede de Modelagem Oceanográfica, Centro de Hidrografia da Marinha, Marinha do Brasil, Niterói, Rio de Janeiro, Brasil

⁴ Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Cerrados, Planaltina, Distrito Federal, Brasil

ORCID: Alves de Paula [0009-0002-7020-1951](https://orcid.org/0009-0002-7020-1951) Araujo Ferreira [0009-0008-5855-052X](https://orcid.org/0009-0008-5855-052X) Eyji Sano [0000-0001-5760-556X](https://orcid.org/0000-0001-5760-556X)

Correspondencia: lourencoalvesdepaula@gmail.com victor.ocn@gmail.com edson.sano@embrapa.br

RESUMEN

El aumento del tráfico marítimo y de las actividades de exploración y producción de petróleo y gas ha incrementado el riesgo de episodios de contaminación por hidrocarburos en zonas costeras sensibles. Este trabajo propone una arquitectura integrada de apoyo operativo que combina detecciones satelitales casi en tiempo real, clasificación, modelización lagrangiana y visualización web. Los resultados se cruzaron con Áreas Marinas Protegidas para identificar interacciones potenciales y estimar el tiempo hasta la primera intersección tras t_0 . Como validación exploratoria, se realizó el cruce entre las detecciones del sistema y registros independientes del organismo federal brasileño de medio ambiente, lo que indicó una convergencia preliminar entre los casos coincidentes y el índice de evidencia propuesto, aunque sin constituir una validación definitiva de la naturaleza del contaminante. Aplicada al sector sur-sureste de la Zona Económica Exclusiva brasileña, la arquitectura mostró potencial para convertir detecciones iniciales en escenarios de riesgo explícitos en el espacio y en el tiempo, con productos disponibles en un panel interactivo de avisos casi en tiempo real.

Palabras clave: manchas de petróleo; Sentinel-1; CERULEAN; OpenDrift; Áreas Marinas Protegidas

Fecha de recepción: 8 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 9 febrero 2026

Sistema integrado de detección y alerta de riesgo de derrames de petróleo en la Zona Económica Exclusiva brasileña


Alves de Paula, Lourenço ^(1,2), Araujo Ferreira, Victor Vinicius ⁽³⁾, Eyji Sano, Edson ^(1,4)


⁽¹⁾ Universidade de Brasília, Distrito Federal, Brasil.


⁽²⁾ Rede de Modelagem Oceanográfica, Centro de Hidrografia da Marinha, Marinha do Brasil, Brasil.

⁽³⁾ Rede de Modelagem Oceanográfica, Centro de Hidrografia da Marinha, Marinha do Brasil, Niterói, Rio de Janeiro, Brasil

⁽⁴⁾ Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Cerrados, Planaltina, Distrito Federal, Brasil

 0009-0002-7020-1951, lourencoalvesdepaula@gmail.com.

 0009-0008-5855-052X, victor.ocn@gmail.com.

 0000-0001-5760-556X, edson.sano@embrapa.br.

Resumen: El aumento del tráfico marítimo y de las actividades de exploración y producción de petróleo y gas ha incrementado el riesgo de episodios de contaminación por hidrocarburos en zonas costeras sensibles. Este trabajo propone una arquitectura integrada de apoyo operativo que combina detecciones satelitales casi en tiempo real, clasificación, modelización lagrangiana y visualización web. Los resultados se cruzaron con Áreas Marinas Protegidas para identificar interacciones potenciales y estimar el tiempo hasta la primera intersección tras t_0 . Como validación exploratoria, se realizó el cruce entre las detecciones del sistema y registros independientes del organismo federal brasileño de medio ambiente, lo que indicó una convergencia preliminar entre los casos coincidentes y el índice de evidencia propuesto, aunque sin constituir una validación definitiva de la naturaleza del contaminante. Aplicada al sector sur-sureste de la Zona Económica Exclusiva brasileña, la arquitectura mostró potencial para convertir detecciones iniciales en escenarios de riesgo explícitos en el espacio y en el tiempo, con productos disponibles en un panel interactivo de avisos casi en tiempo real.

Palabras clave: manchas de petróleo; Sentinel-1; CERULEAN; OpenDrift; Áreas Marinas Protegidas

Integrated system for detection and risk alert of oil spills in the Brazilian Blue Amazon

Abstract: *The increase in maritime traffic and oil and gas exploration and production activities has heightened the risk of oily occurrences in sensitive coastal zones. This study proposes an integrated architecture for operational support, combining near-real-time SAR detections, an evidence index, Lagrangian modeling, and web visualization. Polygons of potential oil slicks detected by CERULEAN in Sentinel-1 imagery were ranked using an evidence index (EI) and converted into initial conditions for drift simulations with OpenDrift/OpenOil, forced by metocean data. The results were intersected with Marine Protected Areas (MPAs) to identify potential intersections and estimate the time until the first intersection after t_0 . As an exploratory validation step, CERULEAN detections were cross-referenced with independent SIEMA records, indicating preliminary convergence between matching cases and higher evidence-index classes. The south-southeastern sector of the Brazilian Blue Amazon was adopted as the case study, and the resulting products were made available through a near-real-time interactive warning dashboard.*

Keywords: *oil slicks; Sentinel-1; CERULEAN; OpenDrift; Marine Protected Areas*

1. INTRODUCCIÓN

El aumento del tráfico marítimo y de la actividad petrolera ha incrementado el riesgo de derrames y sus impactos en ambientes costeros y oceánicos sensibles. En la Zona Económica Exclusiva (ZEE) brasileña, este escenario se

ve agravado por la posible expansión de la frontera petrolera en el margen ecuatorial, lo que hace esencial detectar rápidamente posibles manchas, prever su deriva y anticipar impactos en áreas críticas (Carvalho et al., 2025). En este contexto, los modelos lagrangianos forzados por campos de viento, corrientes y oleaje se

han utilizado ampliamente para predecir la deriva de manchas de petróleo, simulando su transporte y los procesos de intemperización.

Paralelamente, la teledetección mediante radar de apertura sintética (Synthetic Aperture Radar, SAR) ha adquirido relevancia para la detección y el seguimiento cuasi operativo de manchas (Fingas; Brown, 2018). A partir de ello, este trabajo propone una arquitectura modular que integra detecciones SAR, disponibles en la plataforma CERULEAN, y simulaciones lagrangianas con OpenDrift (Dagestad *et al.*, 2018), con el fin de estimar el riesgo de impacto sobre Áreas Marinas Protegidas (AMP). En este estudio, los datos de CERULEAN se tratan como posibles manchas de petróleo, y no como derrames confirmados, ya que la propia plataforma reconoce que los datos SAR, por sí solos, no demuestran de forma concluyente la presencia de petróleo; en algunos casos, las detecciones pueden refinarse mediante revisión humana, sin sustituir la necesidad de validación independiente.

En este contexto, el objetivo consiste en crear un sistema capaz de identificar manchas de petróleo en el mar, prever su desplazamiento e indicar posibles áreas sensibles amenazadas, proporcionando apoyo rápido a la prevención y a la respuesta ambiental.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio y selección de casos

El estudio se centra en el sector sur-sureste de la plataforma continental brasileña (50.2°W; 37.7°W; 29.5°S; 21.2°S). Se trata de un corredor logístico con elevada actividad marítimo-portuaria (ANTAQ, 2025), íntegramente inserto en la ZEE de Brasil.

La región combina una variabilidad meteo-oceanográfica relevante para la deriva, incluyendo vientos estacionales, frentes fríos y procesos de mesoescala asociados a la Corriente de Brasil y a la surgencia costera, además de una elevada vulnerabilidad socioambiental, con presencia de unidades de conservación marino-costeras (ICMBio, 2020).

2.2. Datos

2.2.1. Detección SAR (CERULEAN/Sentinel-1).

CERULEAN es un sistema global de seguimiento de la contaminación marina por petróleo, desarrollado para detectar automáticamente posibles manchas de petróleo en la superficie del mar a partir de imágenes SAR de Sentinel-1, indicando posibles fuentes asociadas, como embarcaciones e infraestructuras offshore. Este sistema es mantenido por SkyTruth, con una interfaz de programación de aplicaciones (API) (<https://api.cerulean.skytruth.org/>) abierta para el acceso a los datos, de uso público con fines de conservación y seguimiento ambiental (SkyTruth, 2026).

A partir de esta base, en este trabajo el término caso corresponde al polígono asociado a una entidad detectada como posible mancha de petróleo en una determinada escena SAR. La primera detección de cada entidad se definió como el instante t_0 .

Además de los polígonos, se calculó un índice de evidencia (IE) a partir de los datos facilitados por la API de CERULEAN. El valor final se obtuvo mediante suma ponderada, conforme a la Ecuación 1.

$$IE = 4 * C_{\text{clasificación}} + 3 * C_{\text{contexto}} + 2 * C_{\text{morfología}} + C_{\text{estructura}} \quad (1)$$

Donde IE representa el Índice de Evidencia, calculado como una puntuación ponderada a partir de cuatro componentes: clasificación, contexto, morfología y estructura. La puntuación asignada a cada componente deriva directamente de atributos ya disponibles en la base de datos de cada caso, como nivel de revisión, etiqueta humana, confianza del modelo, confianza de la mancha, contexto de origen, métricas geométricas y características estructurales de la entidad detectada. Estos atributos se evalúan mediante un conjunto fijo de reglas que asignan incrementos o decrementos a la puntuación de cada componente según refuerzan o debilitan la plausibilidad de la ocurrencia. De este modo, la puntuación de cada componente no resulta de una variable aislada ni de un único parámetro continuo, sino de la combinación reglada de múltiples atributos extraídos de la base del caso. A continuación, las puntuaciones obtenidas se integran mediante una suma ponderada, asignando peso cuatro al componente de clasificación, peso tres al de contexto, peso dos al de morfología y peso uno al de estructura, de manera que la clasificación ejerce la mayor influencia sobre el resultado final, seguida del contexto, mientras que morfología y estructura actúan como refuerzos complementarios. El valor total se convierte después en cinco clases cualitativas de evidencia, según los siguientes umbrales: E5 para puntuaciones mayores o iguales que ocho, E4 para valores mayores o iguales que cinco, E3 para valores mayores o iguales que dos, E2 para valores mayores o iguales que 0 y E1 para valores inferiores a cero. Así, el IE no expresa una medida física directa de la mancha, sino un índice sintético de robustez relativa de las evidencias disponibles, utilizado para jerarquizar los casos y aportar mayor consistencia interpretativa a las alertas emitidas por el sistema.

2.2.2. Validación con registros independientes

Como etapa exploratoria de validación, se utilizaron registros del Sistema de Información de Emergencias Ambientales (SIEMA) del Instituto Brasileño de Medio Ambiente y Recursos Naturales Renovables (IBAMA), que contienen ocurrencias de contaminación por hidrocarburos con referencia espacial y temporal (IBAMA, 2024).

El cruce con las detecciones de CERULEAN se realizó en dos etapas. En primer lugar, se aplicó un filtro temporal de dos días entre la fecha de la ocurrencia en SIEMA y el instante de detección en CERULEAN. A continuación, los candidatos remanentes se evaluaron en cuanto a la proximidad espacial entre el lugar de la ocurrencia y el polígono detectado. El objetivo fue identificar correspondencias plausibles entre registros independientes y los casos detectados automáticamente.

2.2.3. Forzamientos meteo-oceanográficos

Los forzamientos meteo-oceanográficos utilizados fueron el viento a 10 metros (U10) y las corrientes oceánicas superficiales. Los campos de viento se obtuvieron del modelo Global Forecast System (GFS), con resolución de 0.25° (NCEP, 2015). Para las condiciones oceanográficas, se utilizó el producto de reanálisis/predicción del modelo Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM), acoplado al Navy Coupled Ocean Data Assimilation (NCODA), con resolución de 1/12° (Naval Research Laboratory, 2021).

2.2.4. Modelización y estimación del riesgo

La deriva de las manchas de petróleo se simuló con el modelo lagrangiano OpenDrift, mediante el módulo OpenOil. Los polígonos procedentes de la plataforma CERULEAN se utilizan como región inicial del desplazamiento de la mancha (t_0). Estos se rellenan virtualmente con hasta 500 partículas distribuidas sobre el área detectada. El horizonte de simulación varió entre 6 y 180 h, priorizando la predicción a corto plazo para el apoyo a respuestas rápidas de contingencia.

2.2.5. Áreas Marinas Protegidas

Las AMP empleadas en este estudio se obtuvieron a partir de la base mundial WDPA/Protected Planet (UNEP-WCMC, 2025) y se clasificaron según su categoría de gestión de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN). Estas áreas se utilizaron como base espacial para evaluar el potencial de intersección entre las trayectorias simuladas y regiones ambientalmente sensibles.

2.3. Arquitectura web

Se desarrolló un panel interactivo en Leaflet que integra, en un único entorno, la visualización de los casos, de las capas geoespaciales y de los resultados de las simulaciones. La interfaz permite seleccionar fecha, escena y caso, además de controlar capas, clasificación y navegación temporal. Los productos dinámicos se muestran con actualización sincronizada de las partículas y trayectorias simuladas, a partir de archivos ligeros en JSON y GeoJSON, garantizando la coherencia espacial y temporal de las visualizaciones.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La arquitectura propuesta permite organizar los resultados en tres escalas complementarias: fecha de detección, escena Sentinel-1 y caso individual. En este estudio, cada caso corresponde al polígono asociado a una entidad identificada como posible mancha de petróleo en una escena SAR. Esta organización es relevante porque un mismo día puede incluir más de una escena, y cada escena puede contener múltiples casos, de modo que el total de detecciones refleja no sólo la fecha de adquisición, sino también la cobertura orbital y la segmentación espacial de las entidades. Como producto adicional, se desarrolló una interfaz interactiva para la visualización de los casos, su integración con las simulaciones y la consulta de los productos generados por el sistema (<https://lourengoalves.github.io/oceom-web/>).

Como etapa de validación exploratoria, se seleccionaron cinco casos con correspondencia plausible entre registros del SIEMA y detecciones de CERULEAN, tras la aplicación de los criterios de proximidad temporal y espacial descritos en la metodología. En este subconjunto, se observó un predominio de evidencia muy fuerte, con cuatro casos clasificados como E5 y solo uno como E2 (Tabla 1). Este patrón sugiere consistencia en el cálculo del índice propuesto, dado que los valores altos de IE se corresponden con los registros independientes del SIEMA.

Tabla 1. Casos coincidentes entre SIEMA y CERULEAN utilizados en la validación exploratoria.

ID CERULEAN	Fecha	Contaminante SIEMA	IE	Alcanza AMP
4261998	2021-11-04	Agua oleosa	E5	No
4264978	2021-12-03	Aceite lubricante	E5	No
4253412	2022-11-22	Aceite lubricante	E5	No
3679449	2023-03-22	Aceite (no especificado)	E2	No
4254738	2022-03-06	Mezcla oleosa	E5	Si

Tres de estos cinco casos presentaron revisión humana en la base de datos de CERULEAN, todos ellos asociados a etiquetas vinculadas a embarcaciones, mientras que dos permanecieron únicamente en la clasificación automática, incluido un caso también clasificado como E5. Este resultado indica que la revisión humana refuerza la interpretación de los objetivos, pero no constituye la única condición para situar casos plausibles en las clases superiores de evidencia. Al mismo tiempo, la presencia de un caso E2 entre los coincidentes muestra que la correspondencia con SIEMA no elimina la incertidumbre, preservando gradaciones de confianza incluso dentro del subconjunto de validación.

En lo que respecta al riesgo proyectado, cuatro de los cinco casos no presentaron intersección con AMP, mientras que el caso 4254738, detectado el 06/03/2022 y clasificado con IE muy fuerte (E5), presentó una intersección alta inmediata, con una primera intersección ya presente dentro de una AMP, y una deriva simulada que indicaba riesgo para otras dos AMP en las 180 h posteriores a t_0 (Figura 1).

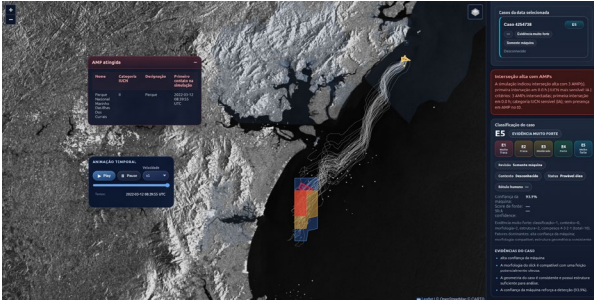


Figura 1. Panel del sistema operativo propuesto tras la detección, clasificación y simulación de deriva del caso (<https://lourencoalves.github.io/oceom-web/?case=4254738>).

Este resultado pone de manifiesto que la validación exploratoria de la detección y el análisis de riesgo espacial corresponden a dimensiones complementarias, aunque distintas, de la arquitectura propuesta: la primera busca verificar la plausibilidad independiente de las entidades detectadas, mientras que la segunda cualifica el potencial impacto ambiental a partir de la simulación de deriva. Así, más que demostrar de forma definitiva la naturaleza de cada ocurrencia, este subconjunto muestra que la arquitectura fue capaz de jerarquizar casos plausibles y, simultáneamente, identificar situaciones en las que una detección inicial coincide con riesgo inmediato para áreas protegidas.

4. CONCLUSIONES

Los resultados indican que la arquitectura propuesta constituye una cadena operativa prometedora para transformar detecciones SAR de CERULEAN en información útil para el triaje y el apoyo a la toma de decisiones, al integrar automáticamente la identificación inicial de la entidad, la simulación de deriva y la evaluación del riesgo sobre AMP. En el subconjunto de validación exploratoria, el predominio de casos clasificados como E5 entre aquellos coincidentes con registros independientes del SIEMA sugiere convergencia entre el índice de evidencia propuesto y las ocurrencias de contaminación por hidrocarburos notificadas, aunque sin constituir una validación definitiva de la naturaleza del contaminante. Además, el caso 4254738 mostró que la arquitectura no sólo jerarquiza casos plausibles, sino que también es capaz de identificar situaciones de riesgo inmediato para áreas sensibles. Así, la principal contribución del estudio no reside en la confirmación concluyente de manchas de petróleo, sino en la capacidad de convertir observaciones iniciales en escenarios de riesgo explícitos en el espacio y en el tiempo, con potencial de aplicación en sistemas casi en tiempo real de seguimiento y respuesta ambiental.

A pesar de encontrarse todavía en una fase inicial de operación, el sistema presentó resultados alentadores, evidenciando su potencial para convertir observaciones iniciales en escenarios de riesgo explícitos en el espacio y en el tiempo, con aplicación prometedora en sistemas casi en tiempo real. Como continuidad, la ampliación de la base muestral y la incorporación de nuevos datos permitirán aumentar la robustez de la arquitectura,

reducir incertidumbres y reforzar su uso operativo, así como contribuir a la definición de mejores patrones de entrada para el modelo OpenDrift.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Centro de Hidrografía da Marinha do Brasil, a la REMO, a la Facultad UnB Planaltina (FUP/UnB) y a SkyTruth por el apoyo prestado en el desarrollo de este estudio y por las detecciones de CERULEAN utilizadas.

6. REFERENCIAS

- Agência Nacional de Transportes Aquaviários. (2025). *Boletim estatístico aquaviário* (3º trim.).
- Carvalho, I. V., Mendonça, L. F. F. de, & Fernandes, E. H. L. (2025). Method for identification and simulation of oil spill dispersion in coastal regions. *Marine Pollution Bulletin*, 221, 118527.
- Dagestad, K.-F., Röhrs, J., Breivik, Ø., & Ådlandsvik, B. (2018). OpenDrift v1.0: A generic framework for trajectory modelling. *Geoscientific Model Development*, 11, 1405–1420. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-1405-2018>
- Fingas, M., & Brown, C. E. (2018). A review of oil spill remote sensing. *Sensors*, 18(1), 91. <https://doi.org/10.3390/s18010091>
- HYCOM Consortium. (n.d.). *GOF3.1: 41-layer HYCOM+NCODA global 1/12° analysis*. <https://www.hycom.org/dataserver/gofs-3pt1/analysis>
- IBAMA. (2024). *Siema – Comunicado de acidente ambiental*.
- INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBio). *Monitoramento da biodiversidade para conservação dos ambientes marinhos e costeiros*. Brasília, DF: ICMBio, 2024.
- Liu, D., Li, Y., & Mu, L. (2023). Parameterization modeling for wind drift factor in oil spill drift trajectory simulation based on machine learning. *Frontiers in Marine Science*, 10, 222347.
- National Centers for Environmental Prediction, National Weather Service, NOAA, U.S. Department of Commerce. (2015). *NCEP GFS 0.25 degree global forecast grids historical archive* [Dataset]. UCAR/NCAR - Geoscience Data Exchange. <https://doi.org/10.5065/D65D8PWK>
- SkyTruth. (2026). *Cerulean methods*. <https://skytruth.org/cerulean-methods/>
- UNEP-WCMC, & IUCN. (2025). *Protected Planet: The World Database on Protected Areas (WDPA)*. Protected Planet.