



Tema 1.3.

El papel de la modelización y simulación en la respuesta a emergencias por vertidos de hidrocarburos.

Contenido

¿Qué modela un “modelo de vertidos”?	2
Del dato al pronóstico: observaciones y forzamientos	3
Cómo ayudan los modelos a decidir	3
1) Anticipar trayectorias, arribadas y ventanas de trabajo	3
2) Elegir contramedidas con criterio (NEBA/SIMA)	4
3) Ajustar el plan día a día con observaciones	4
El rol específico de ADIOS2 y GNOME (NOAA)	4
Lecciones de casos reales	5
Limitaciones y buenas prácticas	5
Ideas clave	5
Referencias	6



La respuesta eficaz a un vertido de hidrocarburos es, ante todo, una carrera contra el tiempo. Durante las primeras horas y días se define la **ventana de oportunidad** para contener la mancha, proteger recursos sensibles y minimizar la exposición de personas y ecosistemas. En ese intervalo, los responsables operativos necesitan respuestas a tres preguntas básicas: **(i) adónde va a ir el petróleo, (ii) cómo cambiarán sus propiedades en el tiempo, y (iii) qué actuaciones ofrecen el mejor balance entre riesgos y beneficios**. La modelización numérica proporciona estimaciones a estas tres preguntas: predice **trayectorias y destinos** (advección-difusión superficial y subsuperficial), simula la **meteorización** (evaporación, disolución, emulsificación, aumento de viscosidad, formación de bolas de alquitrán) y ofrece un marco cuantitativo para comparar estrategias mediante **evaluaciones de beneficio ambiental neto** (NEBA/SIMA) (Reed et al., 1999; IPIECA–IOGP, 2015, 2017).

¿Qué modela un “modelo de vertidos”?

Desde el punto de vista físico y químico, el destino del petróleo responde a dos familias de procesos:

1. **Transporte y dispersión**: la mancha se desplaza por la **corriente superficial**, la **deriva inducida por el viento** (típicamente del orden del 1–4 % de la velocidad del viento sobre el mar) y la **deriva de Stokes** asociada al oleaje; además, la **turbulencia** rompe la lámina en **gotículas** y favorece su mezcla vertical (Reed et al., 1999). Los modelos operativos suelen utilizar un **esquema lagrangiano de partículas** (cada partícula representa masa de hidrocarburo) sometidas a campos de viento, corrientes y oleaje procedentes de la meteorología y la oceanografía operacional (p. ej., HYCOM/ROMS, WW3).
2. **Meteorización (“fate” u “oil weathering”)**: una fracción ligera se **evapora** (dominada por componentes C5–C12), parte **se disuelve** (BTEX), el oleaje promueve la **dispersión natural** en la columna de agua, y el batido puede generar **emulsiones agua-en-aceite** (“mousse”), aumentando la viscosidad y el volumen aparente; a más largo plazo se producen **fotooxidación, biodegradación y sedimentación** de agregados aceite-partículas (Mackay & Stiver, 1984; NOAA,



2023a). La **evolución de propiedades** (densidad/API, viscosidad, contenido de agua) condiciona directamente la **efectividad de las contramedidas** (barreras, skimmers, dispersantes).

Del dato al pronóstico: observaciones y forzamientos

La calidad del pronóstico depende de los **forzamientos ambientales** y de su actualización:

- **Viento y oleaje:** productos de centros meteorológicos (p. ej., análisis y *nowcasts/forecasts*). El oleaje aporta la **deriva de Stokes** y controla la **generación de gotículas** (Reed et al., 1999).
- **Corrientes:** de modelos oceánicos (costeros y de cuenca) y de **radar HF** en tiempo real, muy útil en zonas portuarias y litorales.
- **Satélites y avión:** **SAR** y ópticos detectan película superficial y orientan la inicialización; los **drones** y vuelos *overflights* verifican extensión y espesor.
- **Boyas y drifters:** mejoran la representación de la circulación local y permiten **ajustes de deriva** (leeway) de la mancha.

En operaciones, los servicios nacionales de oceanografía (p. ej., NOAA IOOS/OR&R) y plataformas de situación común (p. ej., **ERMA**) integran datos y modelos en una **Common Operating Picture**, reduciendo la brecha entre modelización y decisión (NOAA, 2023c).

Cómo ayudan los modelos a decidir

1) Anticipar trayectorias, arribadas y ventanas de trabajo

Los mapas de **probabilidad de varamiento**, **tiempos de llegada** a tramos de costa y **conos de incertidumbre** permiten priorizar **barreras de protección**, rutas de despliegue y **recursos sensibles** (humedales, marismas, praderas marinas). La práctica operativa actual usa **conjuntos (ensembles)**: se perturban condiciones iniciales y forzamientos para estimar la **dispersión de resultados**, que es la base para comunicar incertidumbre a mandos y equipos de campo (Reed et al., 1999; French-McCay, 2004).



2) Elegir contramedidas con criterio (NEBA/SIMA)

La simulación de **escenarios con y sin intervención** apoya comparaciones tipo NEBA/SIMA (p. ej., dispersantes vs. contención/recogida, quema in situ, o protección de estuarios). Un ejemplo típico: si el crudo **emulsiona** con rapidez y el oleaje es alto, la recogida mecánica pierde eficacia y un uso **oportuno** de dispersante puede disminuir la **exposición costera** a cambio de aumentar la **exposición pelágica**; la decisión final pondera **sensibilidades biológicas** de superficie y columna de agua (IPIECA–IOGP, 2015, 2017; French-McCay, 2004).

3) Ajustar el plan día a día con observaciones

La **asimilación ligera** (correcciones basadas en sobrevuelos, SAR, boyas y deriva de testigos) permite **re-inicializar** el modelo y **recalibrar** parámetros (p. ej., porcentaje de viento efectivo o coeficientes de difusión). Este bucle de **pronóstico–observación–actualización** mantiene la utilidad táctica del modelo durante toda la emergencia (NOAA, 2023b).

El rol específico de ADIOS2 y GNOME (NOAA)

- **ADIOS2** es el motor para estimar **cómo cambia el petróleo** con el tiempo: evapora cuánto y a qué ritmo, **cuándo emulsiona** y cómo evoluciona la **viscosidad**. Se apoya en una **base de datos de crudos y refinados** (curvas de destilación, densidad/API, fracciones) y en formulaciones validadas de meteorización (NOAA, 2023a). Su salida responde a preguntas clave de logística (“¿cuándo será demasiado viscoso para bombeo?”; “¿persistirá en playa?”).
- **GNOME** calcula **trayectorias y destinos** con un núcleo lagrangiano forzado por **viento, corrientes, mareas y oleaje**. Permite incluir **incertidumbre** (conjuntos) y mapas de **probabilidad de impacto**; se utiliza operativamente por NOAA y agencias asociadas en emergencias reales (NOAA, 2023b).

Usados juntos, **ADIOS2 + GNOME** integran **fate y transporte**: GNOME mueve la masa y ADIOS2 modifica sus propiedades. Este acoplamiento da respuestas más realistas para



proteger recursos, posicionar barreras y calibrar expectativas sobre la eficacia de cada táctica.

Lecciones de casos reales

Los grandes siniestros han ido impulsando esta práctica. Tras **Exxon Valdez**, la **OPA 90** profesionalizó la preparación y la **evaluación de daños** (NRDA) e institucionalizó el uso de productos NOAA (NOAA, 2020). En **Deepwater Horizon**, el reto de una **descarga a gran profundidad** aceleró el uso de **conjuntos**, el seguimiento de **plumas subsuperficiales** y la integración diaria de **observaciones** (French-McCay, 2004; National Academies of Sciences, 2013). Más allá de cada caso, la tendencia global es clara: **menos grandes derrames por petroleros** gracias al doble casco y a MARPOL, pero **retos persistentes** en puertos, plataformas y tráfico costero exigen modelización **operativa, transparente y trazable**.

Limitaciones y buenas prácticas

Ningún modelo “acierta” en todos los detalles: la **resolución de los forzamientos**, las **incertidumbres en caudal, localización y tipo de crudo**, o fenómenos sub-resueltos (frentes, ríos, vientos locales) introducen error. Por eso, las buenas prácticas recomiendan:

- usar **conjuntos y probabilidades**, no trayectorias únicas;
- **documentar supuestos y parámetros** (p. ej., α de viento, coeficientes de difusión);
- **validar con observaciones** y reportar **métricas de habilidad** (error posicional, *hit rate*, Brier, etc.);
- mantener una **trazabilidad** que permita auditorías post-incidente (French-McCay, 2004; Reed et al., 1999).

Ideas clave

- La modelización **gana tiempo** para decidir y focaliza recursos donde **más reducen daño**.



- El binomio **transporte (GNOME)** + **meteorización (ADIOS2)** es un **estándar operativo** en la respuesta.
- Las decisiones tácticas (barreras, dispersantes, quema, protección de hábitats) se benefician de **escenarios comparados** bajo el marco **NEBA/SIMA**.
- La **incertidumbre** no se elimina: se **gestiona** con ensembles, observaciones y comunicación clara a los equipos.

Referencias

- French-McCay, D. P. (2004). Oil spill impact modeling: Development and validation. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 23(10), 2441–2456. <https://doi.org/10.1897/03-382>
- IPIECA & IOGP. (2015). *Net Environmental Benefit Analysis (NEBA) in the context of oil spills*. IPIECA–IOGP Good Practice Guide Series.
- IPIECA & IOGP. (2017). *SIMA—Spill Impact Mitigation Assessment*. IPIECA–IOGP Good Practice Guide Series.
- Mackay, D., & Stiver, W. (1984). Evaporation rate of spills of hydrocarbons and petroleum mixtures. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 62(4), 534–540. <https://doi.org/10.1002/cjce.5450620405>
- National Academies of Sciences. (2013). *An Ecosystem Services Approach to Assessing the Impacts of the Deepwater Horizon Oil Spill in the Gulf of Mexico*. The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/18387>
- NOAA. (2020). *The Oil Pollution Act of 1990: 30 Years of Spill Response and Restoration*. Office of Response and Restoration. <https://response.restoration.noaa.gov>
- NOAA. (2023a). *ADIOS Oil Weathering Model*. Office of Response and Restoration. <https://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/oil-spills/adios-oil-weathering-model>
- NOAA. (2023b). *GNOME Suite for Oil Spill Modeling*. Office of Response and Restoration. <https://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/oil-spills/gnome-suite>



- NOAA. (2023c). *Environmental Response Management Application (ERMA®)*. Office of Response and Restoration. <https://response.restoration.noaa.gov>
- Reed, M., Johansen, Ø., Brandvik, P. J., Daling, P., Lewis, A., Fiocco, R., Mackay, D., & Prentki, R. (1999). Oil spill modeling towards the close of the 20th century: Overview of the state of the art. *Spill Science & Technology Bulletin*, 5(1), 3–16.