

UC Davis

UC Davis Previously Published Works

Title

Oil in the Sea IV: Quick Guide for Practitioners and Researchers: Spanish Version (2025)

Permalink

<https://escholarship.org/uc/item/808312jg>

Authors

Tikka, KK

Levine, E

Asa-Awuku, A

et al.

Publication Date

2025

DOI

10.17226/29127

Peer reviewed

This PDF is available at <https://nap.nationalacademies.org/29127>



Oil in the Sea IV: Quick Guide for Practitioners and Researchers: Spanish Version (2025)

DETAILS

88 pages | 6 x 9 | PDF

ISBN 978-0-309-99263-3 | DOI 10.17226/29127

CONTRIBUTORS

Committee on Oil in the Sea IV; Ocean Studies Board; Division on Earth and Life Studies; National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine

BUY THIS BOOK

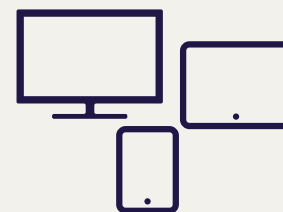
FIND RELATED TITLES

SUGGESTED CITATION

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2025. *Oil in the Sea IV: Quick Guide for Practitioners and Researchers: Spanish Version*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/29127>.

Visit the National Academies Press at nap.edu and login or register to get:

- Access to free PDF downloads of thousands of publications
- 10% off the price of print publications
- Email or social media notifications of new titles related to your interests
- Special offers and discounts



All downloadable National Academies titles are free to be used for personal and/or non-commercial academic use. Users may also freely post links to our titles on this website; non-commercial academic users are encouraged to link to the version on this website rather than distribute a downloaded PDF to ensure that all users are accessing the latest authoritative version of the work. All other uses require written permission. ([Request Permission](#))

This PDF is protected by copyright and owned by the National Academy of Sciences; unless otherwise indicated, the National Academy of Sciences retains copyright to all materials in this PDF with all rights reserved.



NATIONAL
ACADEMIES

Sciences
Engineering
Medicine

Petróleo en el mar, IV edición

Guía rápida para profesionales e investigadores

ACERCA DE ESTE FOLLETO

Con el apoyo de muchas agencias y de la industria, las Academias Nacionales de Ciencias, Ingeniería y Medicina han asesorado al país sobre las fuentes, el destino y los efectos del petróleo en el mar desde la década de 1970. Los informes publicados en 1975, 1985 y 2003 han sido fundamentales para ayudar a mejorar la ciencia de los derrames de petróleo, prevenir y reducir las entradas de los vertidos operativos y accidentales de petróleo y reducir los impactos de los vertidos nocivos en el medio ambiente. Este folleto proporciona información clave de *Petróleo en el mar, IV edición: Entradas, destinos y efectos*, publicado en 2022, que se benefició de avances importantes en los métodos científicos para detectar la entrada y el destino del petróleo en el mar y de lecciones aprendidas de la explosión y el derrame de petróleo de la plataforma *Deepwater Horizon* en 2010. Más allá de los informes anteriores, *Petróleo en el mar, IV edición* incluye un análisis de los impactos del petróleo en el mar y el medio ambiente marino del Ártico en la salud humana y de las iniciativas de prevención y respuesta que pueden ayudar a reducir la cantidad de petróleo que llega al mar y a minimizar sus efectos. Este folleto tiene la intención de servir de guía de referencia para quienes participan en la investigación y respuesta ante derrames de petróleo.

Índice

Entradas: fuentes de petróleo en el océano	3
Tendencias de investigación sobre las entradas de petróleo al océano	6
De cara al futuro: fuentes futuras de petróleo en el mar	11
Minimizar derrames accidentales de petróleo	16
Control de fuentes	17
Respuesta ante derrames de petróleo	21
Herramientas de respuesta ante derrames de petróleo	21
Protección y limpieza de la costa	28
De cara al futuro: necesidades de respuesta ante derrames futuros de petróleo	31
Brechas en la investigación: control de fuentes y respuesta ante derrames de petróleo	33
Destinos: ¿a dónde va el petróleo?	34
Avances recientes en la comprensión del destino del petróleo	37
Información sobre el destino del petróleo proporcionada por el derrame de petróleo de la plataforma Deepwater Horizon	40
Brechas en la investigación: destino del petróleo en el mar	43
Efectos: ¿qué daño puede causar el petróleo?	45
Modos de exposición al petróleo	48
Avances recientes en la comprensión de los efectos del petróleo en los ecosistemas	53
Brechas en la investigación: efectos del petróleo en el mar	54
Efectos de los derrames de petróleo en los seres humanos	56
Brechas en la investigación: efectos de los derrames de petróleo en la salud de los seres humanos	60
Marco para el avance de la ciencia sobre los derrames de petróleo	61
Recomendaciones adicionales de investigación	68
Investigación recomendada para avanzar en la respuesta ante derrames de petróleo y minimizar los efectos	68
Necesidades de investigación para comprender mejor el destino del petróleo en el medioambiente marino	70
Investigación recomendada para avanzar en la comprensión de los efectos del petróleo en el mar sobre el medioambiente marino	75



En los últimos 20 años se han producido muchos cambios en la forma de extraer, transportar y consumir petróleo y gas natural, lo que, a su vez, ha cambiado las vías a través de las cuales el petróleo llega al medioambiente. Además, investigaciones nuevas han ayudado a los reguladores a implementar requisitos nuevos de seguridad, a los equipos de respuesta ante derrames a desarrollar técnicas innovadoras de limpieza de petróleo y a la industria a implementar prácticas operativas y medidas de seguridad modernizadas para limitar la contaminación por petróleo.

A pesar del progreso significativo en la reducción de la contaminación por petróleo en el mar, persisten los riesgos. En aguas de América del Norte, se estima que la contaminación por petróleo proveniente de la escorrentía terrestre es hasta 20 veces mayor que hace 20 años y los derrames y vertidos de petróleo provenientes de las operaciones de petróleo y gas siguen siendo fuentes importantes de contaminación. Al mismo tiempo, las tormentas más intensas, el envejecimiento de la infraestructura y la subida del nivel del mar —como consecuencia del cambio climático— suponen riesgos adicionales de derrame de petróleo.

En las décadas pasadas recientes se han producido avances notables y sin precedentes en la ciencia de los derrames de petróleo, en particular después del derrame de petróleo de *Deepwater Horizon* (DWH). El financiamiento sostenido de la investigación ha dado como resultado una extraordinaria producción de investigaciones de campo, laboratorio e instalaciones de prueba, que han generado nuevos conocimientos sobre la composición del petróleo, los efectos de los esfuerzos de respuesta, los procesos de la descomposición del petróleo y los impactos que el petróleo tiene sobre la salud de los ecosistemas y las comunidades. Estos avances demuestran la necesidad de una investigación sostenida para garantizar la eficacia de los esfuerzos para prevenir daños a la vida marina y a las comunidades costeras.

Con el apoyo de muchas agencias y de la industria, las Academias Nacionales publicaron informes en 1975, 1985 y 2003 sobre las fuentes, el destino y los efectos del petróleo en el mar. *Petróleo en el mar, IV edición*, el cuarto informe de la serie, documenta el estado actual del conocimiento sobre estos temas y refleja casi 20 años de investigación sobre los efectos a largo plazo de los derrames de petróleo en el medioambiente, a partir de incidentes como el derrame del petrolero *Exxon Valdez* y la explosión y el derrame de petróleo de DWH. El informe identifica brechas en la investigación y la comprensión, recomienda medidas para minimizar la contaminación por petróleo y solicita financiamiento sostenido para la investigación a fin de comprender mejor cómo el petróleo llega a los entornos oceánicos y los afecta.

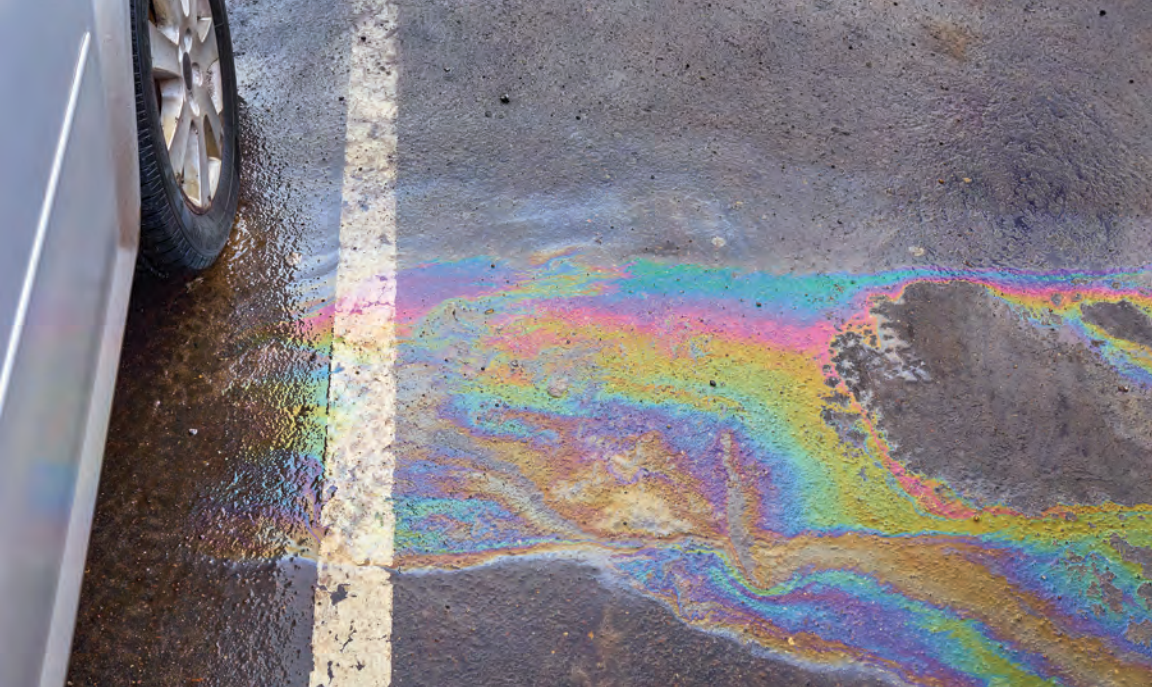
FUENTE DE LA IMAGEN: Geri Lavrov.

¿Cuál es la novedad de *Petróleo en el mar*, IV edición?



En este informe se actualiza el informe anterior *Petróleo en el mar*, III edición sobre el inventario de las fuentes, la composición y la cantidad de petróleo en el medioambiente marino y analiza los avances recientes en la comprensión del destino y los efectos del petróleo en el mar. *Petróleo en el mar*, IV edición también incluye los siguientes temas nuevos y una cobertura ampliada de temas anteriores.

- Análisis exhaustivo del destino y los efectos del petróleo en el mar, que incorpora los avances en la comprensión de estos campos logrados en los últimos 20 años.
- Síntesis de la investigación extensa posterior al derrame de DWH, después de 10 años de financiamiento dedicado a la ciencia de los derrames de petróleo.
- Análisis de la respuesta ante derrames de petróleo, en términos de minimizar tanto la cantidad de petróleo derramado como sus efectos en el medioambiente y las personas.
- Consideración de asuntos relacionados con la salud humana y la seguridad de los mariscos.
- Identificación de brechas en la comprensión de las fuentes, el destino y los efectos del petróleo en el mar y sugerencias para futuras investigaciones.
- Recomendaciones generales para el avance de la ciencia de los derrames de petróleo.



Entradas: fuentes de petróleo en el océano

El petróleo es un combustible fósil que se formó en la corteza terrestre a partir de restos de plantas y organismos marinos (consulte el recuadro 1). Como fuente de energía y para la síntesis química, el petróleo es fundamental para el crecimiento tecnológico y económico mundial. El petróleo y el gas natural proporcionaron más del 50 % del suministro energético mundial en 2023, con una alta demanda energética impulsada por el crecimiento demográfico y la mejora del nivel de vida en todo el planeta. Aunque el mundo se centra en reducir su dependencia del petróleo y del gas para combatir el cambio climático mundial, la exploración, la producción y el transporte global de petróleo y gas continuarán en el futuro previsible.

Aunque muchas personas imaginan grandes derrames de petróleo como el *Exxon Valdez* o DWH cuando oyen hablar de petróleo en el mar, el petróleo entra al océano desde diversas fuentes (consulte la figura 1).

FUENTE DE LA IMAGEN: Alan Mearns.

Las fuentes de entrada de petróleo al medioambiente marino incluyen las siguientes:

- **Filtraciones naturales de petróleo y gas**, que son lugares por donde el petróleo entra naturalmente al océano a través de fallas y fracturas en el lecho marino.
- **Extracción de petróleo**, que incluye derrames de plataformas de perforación de producción, deposición de emisiones atmosféricas de petróleo de plataformas y agua producida por la producción de petróleo y gas en alta mar.
- **Transporte de petróleo**, que incluye derrames de oleoductos, derrames de buques cisterna, derrames de instalaciones costeras y deposición de gases de escape de buques cisterna y emisiones de carbono orgánico volátil.
- **Utilización de petróleo**, que incluye escorrentías terrestres, derrames de embarcaciones comerciales, vertidos operativos de embarcaciones comerciales y deposición atmosférica de fuentes terrestres.

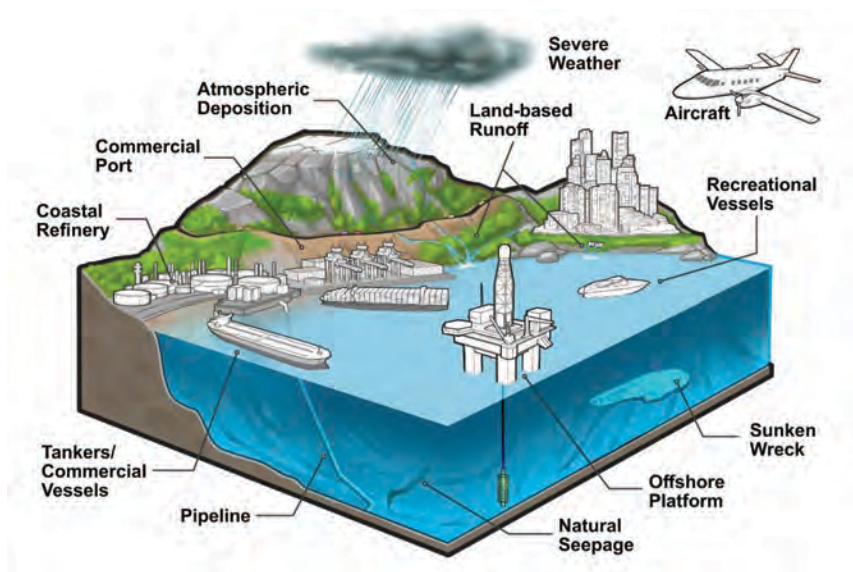


FIGURA 1 Fuentes de entrada de petróleo al medioambiente marino.

FUENTE: Cortesía del Instituto Estadounidense del Petróleo, producido por Iron Octopus Productions, Inc.

RECUADRO 1**¿Qué es el petróleo?**

El petróleo, a veces llamado crudo, es un combustible fósil que se forma en la corteza terrestre a partir de restos de plantas y organismos de agua dulce y marinos depositados en sedimentos. A lo largo de cientos de miles a millones de años, los compuestos orgánicos presentes en estos sedimentos se transformaron en petróleo (petróleo y gas).

El petróleo es una mezcla compleja de miles de compuestos orgánicos. La composición de cada yacimiento petrolífero varía debido a diversos factores, como la fuente de materia orgánica, la distribución de elementos del yacimiento rocoso y la degradación de los materiales petrolíferos con el tiempo. Estas diferencias en la composición se traducen en diferencias en propiedades como la volatilidad, la solubilidad en agua, la facilidad o dificultad de dispersión y la persistencia ambiental, que contribuyen al destino y los efectos del petróleo en el medioambiente. Los avances recientes en las metodologías de química analítica permiten a los científicos investigar la composición química del petróleo para identificar el origen de los derrames e informar sobre los planes de respuesta, mitigación y limpieza. Algunos componentes del petróleo son tóxicos y perjudiciales para las personas, los animales y el medioambiente.

No todas las fuentes de petróleo en el océano tienen el mismo impacto. Las fuentes naturales de petróleo tienen efectos diferentes en la vida marina que los derrames accidentales. El volumen y la velocidad de vertido de petróleo, así como otros factores, son importantes para determinar tanto el destino como los efectos del petróleo en el medioambiente marino. Por ejemplo, las fisuras y fallas naturales del lecho marino suelen liberar petróleo lentamente a lo largo de cientos o miles de años, lo que permite a organismos y ecosistemas circundantes evitar la filtración, adaptarse y, en algunos casos, prosperar en su presencia. Por ejemplo, las filtraciones naturales suelen contener diversas comunidades microbianas que han evolucionado para utilizar el petróleo como fuente de energía y nutrientes y favorecen numerosos procesos biogeoquímicos (incluida la degradación del petróleo), en especial, en las profundidades marinas.

En contraposición, los derrames accidentales de petróleo pueden ocurrir en diferentes lugares, tener diferentes composiciones y concentraciones y ocurrir en períodos distintos de los que suelen ocurrir en la naturaleza y, por lo tanto, tendrán diferentes efectos sobre el medioambiente.

Tendencias recientes en las entradas de petróleo al océano

Para examinar cómo los cambios en la producción y el consumo de petróleo durante las dos décadas pasadas han afectado las entradas de petróleo, *Petróleo en el mar, IV edición* estima el volumen de petróleo procedente de diferentes fuentes para ofrecer una comparación con las estimaciones de informes anteriores (consulte la tabla 1).

- **La principal fuente de petróleo en el océano es la escorrentía terrestre, con un volumen estimado hasta 20 veces superior al registrado hace dos décadas.** Ahora hay más personas y más autos en las ciudades costeras de Norteamérica, lo que ha incrementado la contaminación por petróleo, que se extiende desde estacionamientos y carreteras hasta ríos y océanos. Cuantificar las cantidades exactas y la contribución de actividades específicas sigue siendo difícil debido a la falta de datos específicos
- **La segunda fuente más importante son las filtraciones naturales de petróleo a través de fallas y fracturas en el lecho marino.** Estas estimaciones son aproximadamente un tercio inferiores a las realizadas en la década de 1990, debido a cambios en la metodología de estimación, que incluye los avances en teledetección.
- **La tercera fuente más importante son los derrames de petróleo.** En los últimos 20 años, el volumen de derrames disminuyó de manera significativa en oleoductos, embarcaciones y refinerías costeras. Después del derrame de petróleo de DWH, se ha prestado mayor atención a la seguridad en las industrias de petróleo, gas y transporte marítimo. Se modificaron las regulaciones que rigen las operaciones de petróleo y gas en alta mar y se lograron avances en la prevención de explosiones y el control de fuentes. Nuevas medidas de rendimiento y mecanismos de cumplimiento han mejorado la seguridad de los oleoductos y se han introducido nuevas regulaciones sobre el diseño y la operación de buques que transportan petróleo o gas como carga o combustible y sobre los motores que utilizan los vehículos recreativos. Estos cambios han disminuido el volumen de derrames de oleoductos, buques que transportan petróleo y refinerías costeras.

Otra fuente importante son los vertidos de las operaciones de petróleo y gas, que incluyen aguas oleosas provenientes de la producción de petróleo y gas en alta mar y vertidos provenientes de las operaciones de maquinarias en embarcaciones comerciales. En el pasado, Estados Unidos era un importador neto de hidrocarburos, pero ahora, debido al aumento de la producción y a los cambios en la legislación, es exportador de petróleo crudo y gas natural, lo que ha incrementado la actividad en terminales y rutas de transporte marítimo. El aumento de la producción petrolera en alta mar también ha incrementado el volumen de petróleo vertido durante las operaciones.

NECESIDAD DE DATOS SOBRE LAS FUENTES DE PETRÓLEO

Debido a la falta de datos es difícil determinar los volúmenes de petróleo que entran al océano desde algunas fuentes. Si bien existen suficientes datos para comprender las tendencias —y, en algunos casos, para proporcionar estimaciones más precisas— faltan datos para estimar con exactitud muchas entradas de petróleo en aguas norteamericanas. Esto es en particular cierto para estimar las entradas de petróleo provenientes de la escorrentía terrestre. Salvo por el petróleo liberado por derrames y la estimación de las filtraciones naturales, ha habido décadas de inacción en la medición de las entradas de petróleo al océano, con escasos avances en este aspecto desde el informe original *Petróleo en el mar* de 1975. Datos más específicos permitirían a los científicos identificar las fuentes de petróleo más significativas, con mayor probabilidad de tener efectos adversos sobre los organismos marinos o más susceptibles de esfuerzos de mitigación.

TABLA 1 Estimaciones de las entradas de petróleo según lo informado en *Petróleo en el mar, IV edición*, en comparación con las estimaciones de *Petróleo en el mar, III edición*

Fuente de entrada	Petróleo en el mar, IV edición (2010-2019) (TM/año)		Petróleo en el mar, III edición ^a (1990-1999) (TM/año)
Fuentes naturales (total sin incluir gas natural)	100.000		160.000
Filtraciones de petróleo	100.000		160.000
Filtraciones de gas	2-9 Tg ^b		No se informó
Extracción de petróleo	no incluye DWH	incluye DWH	2.980
	9.500	66.500	
Plataformas	1.100		160
MC-20	1.600 ^c		
DWH	57.000		
Deposición atmosférica	No se informó		120
Aguas producidas	6.800		2.700
Transporte de petróleo	818		9.209
Derrames de oleoductos	380		1.900
Derrames de embarcaciones cisterna	200		5.300
Derrames de embarcaciones comerciales	8		99
Derrames en terminales costeras	220		1.900
Derrames en refinerías costeras	10		Incluido en derrames de terminales

Fuente de entrada	Petróleo en el mar, IV edición (2010-2019) (TM/año)	Petróleo en el mar, III edición ^a (1990-1999) (TM/año)
Deposición atmosférica	No se informó	10
Consumo de petróleo	1.200.399	83.520
Escoorrentía terrestre	1.200.000	54.000
Embarcaciones marinas recreativas	No se informó	5.600
Derrames (embarcaciones no cisterna)	390	1.200
Vertidos de operaciones (embarcaciones >100 GT)	9 ^d	100
Vertidos de operaciones (embarcaciones <100 GT)	0 ^d	120
Deposición atmosférica	No se informó	21.000
Vaciado de aeronaves	No se informó	1.500
Total^e	1.400.000	260.000
Total^e (no incluye consumo y DWH)	110.000	170.000

^a La "mejor estimación" de Petróleo en el mar, III edición se muestra en esta columna.

^b Los volúmenes de la brecha se expresan en teragramos (Tg).

^c El valor mostrado refleja un valor de .600 TM/año (30 barriles/día), la cantidad de petróleo recolectado en el yacimiento desde abril de 2019. Este valor podría ser una sobreestimación o una subestimación del vertido anual del período 2010-2019 (consulte la tabla para el rango de estimaciones publicadas).

^d Se asume el pleno cumplimiento de las regulaciones de vertido.

^e Los valores y totales informados se redondearon a dos cifras significativas

RECOMENDACIÓN

Mejora de la cuantificación de las entradas de petróleo al mar

En reconocimiento de las décadas de inacción respecto a las recomendaciones del informe *Petróleo en el mar* de medir las entradas naturales y antropogénicas de petróleo para informar la mitigación de los efectos en el medioambiente marino, el comité recomienda que un grupo independiente comunique las medidas y las responsabilidades de las agencias norteamericanas para obtener datos apropiados que permitan cuantificar mejor la entrada de petróleo en el mar. Se deben adoptar las siguientes medidas para cuantificar mejor la entrada de petróleo en el medioambiente marino:

- Las agencias federales deben colaborar con la industria y el mundo académico para usar las técnicas existentes, junto con la exploración de nuevas tecnologías, para identificar y cuantificar las entradas de las filtraciones naturales, incluidas las zonas menos estudiadas recientemente, tales como el margen del Pacífico norteamericano, el margen del Ártico norteamericano y las filtraciones recientemente descubiertas en el margen del Atlántico norteamericano. Se debe dar prioridad a las zonas de prospección y producción de energía en alta mar y a lo largo de las rutas de navegación marítima para evaluar mejor los niveles de fondo de petróleo en el mar e informar la evaluación de los daños.
- Las agencias federales deben colaborar con las autoridades estatales y locales para llevar a cabo un control periódico de las entradas de petróleo provenientes de fuentes terrestres de agua (escorrentías, ríos, puertos y vertidos directos de aguas residuales a estuarios y océanos costeros) con el fin de determinar las entradas de petróleo en el medioambiente marino.
- Las agencias federales deben apoyar la investigación para precisar las estimaciones de las entradas terrestres de petróleo que se transportan a través de la atmósfera al mar (incluido el vaciado de combustible en vuelo) mediante (1) la ampliación de la cobertura geográfica y temporal de la recopilación de datos; y (2) el perfeccionamiento de la comprensión de la fuente de los hidrocarburos medidos en las atmósferas marinas y el agua de mar superficial
- Las agencias pertinentes deben colaborar con la industria para conocer mejor la composición y las concentraciones del agua producida (de las actividades de prospección y producción en alta mar) liberada en el medioambiente marino y aplicar prácticas para reducir los posibles impactos medioambientales de estos vertidos.
- Se debería realizar un estudio sobre el nivel de cumplimiento del Anexo I de Contaminación marina (Marine Pollution, MARPOL) que señala las regulaciones de la Organización Marítima Internacional para prevenir la contaminación marina por petróleo, a fin de establecer una base para controlar los cambios en el cumplimiento.

De cara al futuro: fuentes futuras de petróleo en el mar

En los próximos años, es probable que otras fuentes de petróleo se conviertan en entradas más significativas de contaminación al océano como consecuencia de los siguientes factores de estrés y otros.

DAÑO A LA INFRAESTRUCTURA PETROLERA CAUSADO POR CONDICIONES METEOROLÓGICAS EXTREMAS Y LA SUBIDA DEL NIVEL DEL MAR

Las dos décadas pasadas se han caracterizado por el calentamiento global. El aumento de tormentas y huracanes intensos y frecuentes y la subida del nivel del mar asociada al calentamiento global podrían dañar estructuras en alta mar, oleoductos e instalaciones costeras, lo que representa un riesgo significativo de futuras entradas de petróleo al océano (consulte el recuadro 2 para ver un ejemplo de daño a la infraestructura petrolera causado por un huracán). Revisar la integridad de la infraestructura energética para determinar si puede soportar una mayor frecuencia e intensidad de eventos meteorológicos extremos y realizar las modificaciones estructurales necesarias ayudaría a mitigar este riesgo.

DETERIORO DE LA INFRAESTRUCTURA ENERGÉTICA OBSOLETA

A medida que la infraestructura energética en alta mar obsoleta se deteriora (como pozos, oleoductos e instalaciones abandonadas o inactivas y naufragios), se convertirá en una fuente cada vez más importante de petróleo. Los componentes estructurales de tuberías, válvulas y accesorios de los pozos, e incluso los materiales utilizados para taponar un pozo, son susceptibles a la corrosión, la descomposición, los movimientos tectónicos y los deslizamientos submarinos. La recuperación o el taponamiento de estas instalaciones ayudaría a minimizar el impacto potencial si la infraestructura falla.

AUMENTO DE LA EXPLORACIÓN Y EL TRANSPORTE MARÍTIMO DE PETRÓLEO EN EL ÁRTICO

A medida que el clima se calienta y la capa de hielo marino disminuye, la región ártica se vuelve más accesible. El océano Ártico contiene el 21 % de la plataforma continental mundial —una formación geológica que alberga la mayoría de los depósitos de petróleo recuperables—, y se estima que la costa norte de Alaska, en los mares de Chukchi y Beaufort, podría contener entre 14.000 y 47.000 millones de barriles de petróleo recuperable (consulte la figura 2). A medida

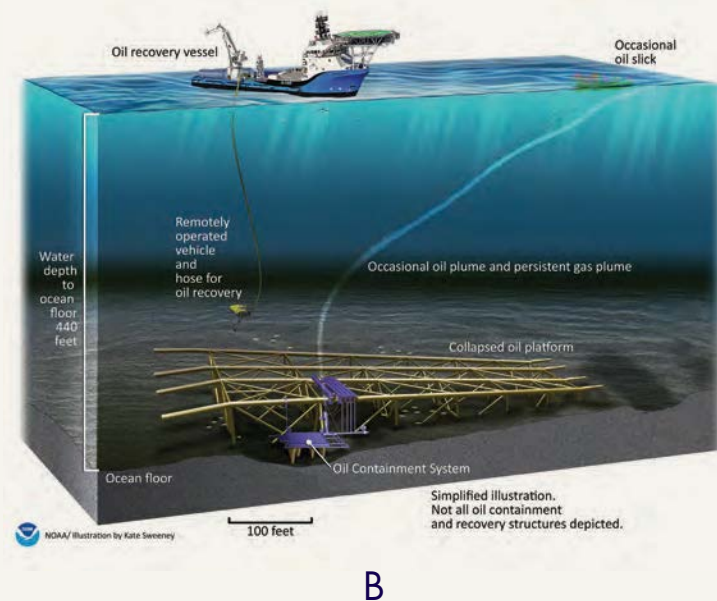
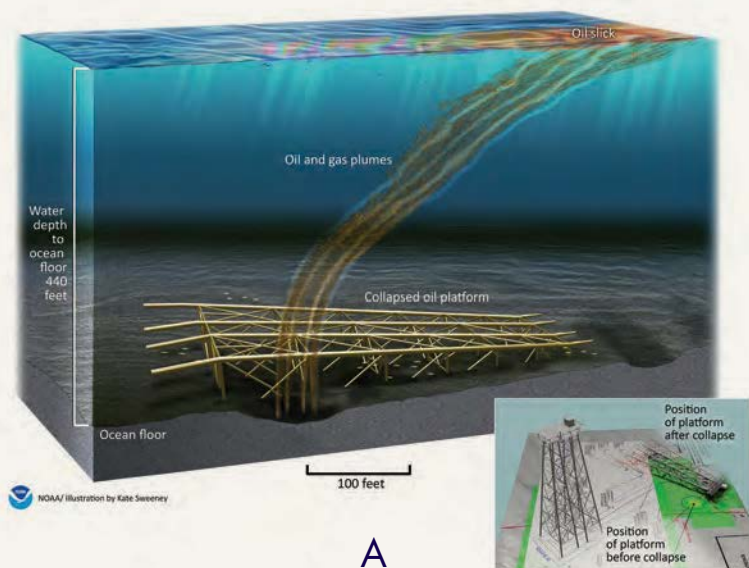
RECUADRO 2**Derrame de petróleo del bloque 20 del cañón Mississippi**

Después del huracán Iván, de categoría 3, en septiembre de 2004, un deslizamiento de tierra submarino provocó el derrumbe de la plataforma de petróleo y gas Mississippi Canyon 20 (MC-20) sobre el fondo del golfo de México, aproximadamente a 11 millas de la costa de Luisiana. La estructura se derrumbó y fue arrastrada hacia el sur, rompiendo y enterrando en sedimentos el conjunto de 28 tuberías perforadas para transportar petróleo a la superficie. Esto provocó una liberación lenta de petróleo de las tuberías rotas a unos 500 pies de profundidad.

Durante 14 años, los oleoductos rotos derramaron petróleo y el propietario de la plataforma intentó controlar los derrames. Desde entonces, el sitio MC-20 ha sido fuente de columnas persistentes de petróleo y gas, así como de manchas de petróleo superficiales. En 2018, la Guardia Costera de EE. UU. federalizó la respuesta y contrató a un grupo para diseñar, fabricar, instalar y operar una estructura de recuperación para reducir la cantidad de petróleo que entraba en las aguas del golfo de México. Esta fue una situación única que requirió una solución de control de origen única en su tipo. El innovador sistema de contención y recuperación de petróleo subterráneo se instaló en abril de 2019.

FIGURA (A) La plataforma petrolera Saratoga del bloque 20 del cañón Mississippi colapsó tras el huracán Iván en 2004. El petróleo y el gas se vertieron en el golfo de México y ascendieron a la superficie del océano, creando una capa visible de petróleo. (B) La Guardia Costera de EE. UU. dirigió la instalación de un sistema de contención de petróleo (en la imagen, en morado), diseñado para contener y recuperar la mayor cantidad posible de petróleo. Una embarcación de recuperación de petróleo se conecta periódicamente al sistema de contención para retirar el petróleo acumulado y transportarlo a la costa.

FUENTE: Kate Sweeney, Administración Nacional Oceánica y Atmosférica.



que estos recursos se vuelven más accesibles, el aumento de la exploración, la producción y el transporte de petróleo traerá nuevas entradas de petróleo al océano. Un Ártico más accesible también traerá consigo un aumento de los vertidos de petróleo procedentes de la pesca comercial, el transporte marítimo y el tráfico turístico.

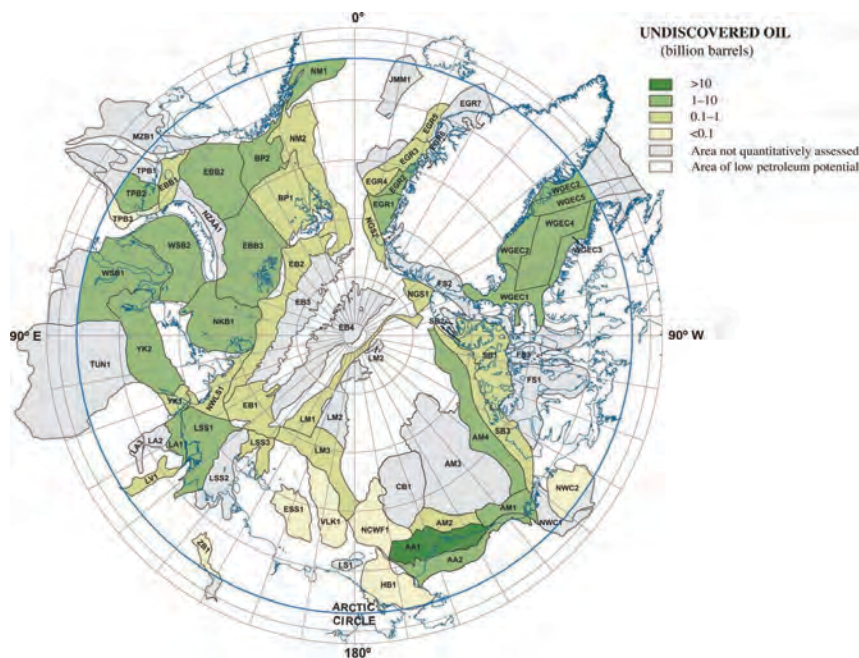


FIGURA 2 Mapa que muestra las estimaciones de petróleo no descubierto al norte del Círculo Polar Ártico.

NOTA: Las líneas negras indican los límites de la unidad de evaluación.

FUENTE: Gautier, D. L., K. J. Bird, R. R. Charpentier, A. Grantz, D. W. Houseknecht, T. R. Klett, T. E. Moore, J. K. Pitman, C. J. Schenk, J. H. Schuenemeyer, K. Sorensen, M. E. Tennyson, Z. C. Valin y C. J. Wandrey. 2009. Assessment of undiscovered oil and gas in the Arctic. *Science* 324(5931):1175–1179. <https://doi.org/10.1126/science.1169467>.

RECOMENDACIONES

- El Gobierno debe realizar una revisión exhaustiva de la integridad de la infraestructura energética costera terrestre y marítima, para determinar si puede soportar una mayor frecuencia e intensidad de eventos meteorológicos extremos y otros peligros naturales, lo que incluye lo siguiente:
 - a. Revisión y actualización de los criterios de diseño para eventos meteorológicos extremos ante nuevos datos.
 - b. Evaluación de las modificaciones necesarias a las estructuras existentes para prevenir o mitigar daños o derrames de petróleo resultantes de eventos meteorológicos extremos.
 - c. Desarrollo de planes de respuesta y capacidades de respuesta correspondientes para reducir y mitigar derrames en caso de daños causados por eventos meteorológicos extremos.
- Para mitigar los posibles derrames de infraestructuras obsoletas, las agencias competentes deben realizar un inventario de los restos existentes de actividades de almacenamiento, transporte o producción de petróleo que aún deben identificarse. Se debe priorizar la recuperación o el taponamiento de estas instalaciones con base en el posible impacto en caso de falla de la infraestructura.
- Para mantener preparada la respuesta, el Gobierno debe evaluar los impactos económicos y medioambientales de los cambios en el transporte marítimo de embarcaciones sobre el riesgo de contaminación, como la introducción de nuevos tipos de combustible, el aumento del tamaño de las embarcaciones, los nuevos tipos de carga (gas natural licuado, otros gases, biocombustibles y bituminosos diluidos) y los nuevos patrones de tráfico e infraestructura en alta mar.



Minimización de derrames accidentales de petróleo

El derrame de petróleo de DWH fue un evento catastrófico que cobró 11 vidas y liberó más petróleo en aguas estadounidenses que cualquier otro derrame. Se estima que se liberaron 535.000 toneladas de petróleo en un período de 87 días desde fuentes a profundidades superiores a los 1.500 metros del golfo de México. La explosión y el incendio en la plataforma de perforación DWH provocaron el hundimiento de la plataforma, lo que causó la rotura de los tubos ascendentes submarinos. Durante los 30 días siguientes, el flujo a través del tubo ascendente doblado aumentó y el petróleo continuó derramándose desde el extremo del tubo ascendente hasta que se tapó el pozo.

Después del derrame de DWH, las agencias gubernamentales, la industria y los organismos reguladores trabajaron para desarrollar maneras de prevenir que un desastre similar se repita. Los resultados fueron nuevas tecnologías, mejores prácticas y regulaciones destinadas a reducir la probabilidad de derrames de petróleo y la cantidad de contaminación por petróleo cuando ocurren, lo que incluye mejoras tecnológicas para detectar anomalías durante las operaciones de perforación y medidas de control de origen que pueden prevenir rápidamente grandes derrames y explosiones.

FUENTE DE LA IMAGEN: Administración Nacional Oceánica y Atmosférica.

Control de fuentes

Las siguientes estrategias avanzadas de control de fuentes pueden reducir el volumen de petróleo que entra al mar y los consiguientes impactos medioambientales y socioeconómicos de un derrame de petróleo (consulte la Figura 3).

RECUPERACIÓN COMO CONTROL DE FUENTES PARA DERRAMES DE EMBARCACIONES

Cuando una embarcación se ve involucrada en un accidente grave —por ejemplo, una colisión o un encallamiento— existe el riesgo de que se libere petróleo al medioambiente. Las operaciones de recuperación de embarcaciones en peligro han demostrado ser una medida de mitigación importante para prevenir o reducir la pérdida de petróleo al mar. En caso de accidente de una embarcación, las organizaciones de recuperación y extinción de incendios marinos ayudan a extinguir los incendios, estabilizar la estructura de la embarcación y transferir el petróleo a otra embarcación o cisterna de almacenamiento, lo que reduce la cantidad que se puede fugar al mar.

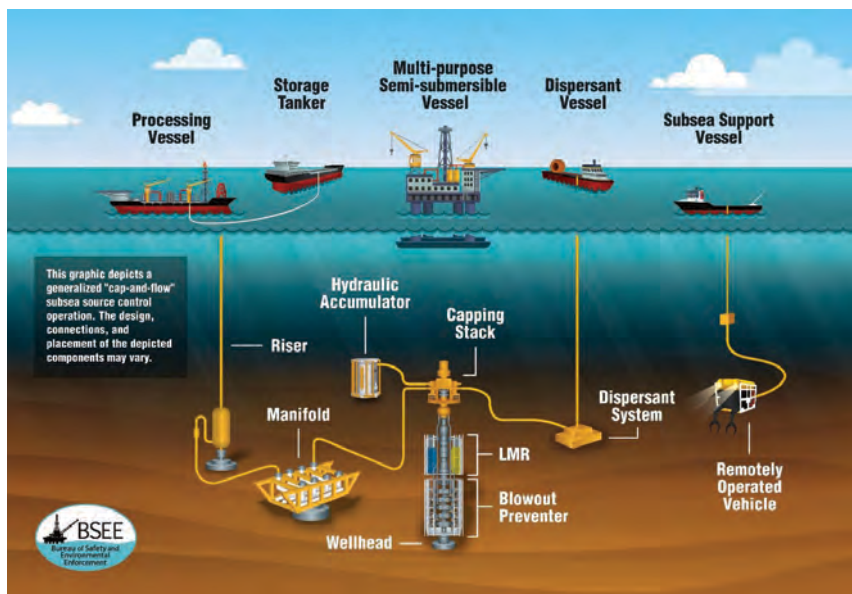


FIGURA 3 Ilustración de las actividades de control de fuentes.

FUENTE: Oficina de Seguridad y Control Medioambiental.

Las operaciones de recuperación también son importantes para la extracción segura de petróleo de naufragios hundidos. Solo en aguas de América del Norte, hay al menos 236 grandes naufragios hundidos que contienen entre 600.000 y 6 millones de barriles de petróleo, lo que podría representar una amenaza de contaminación en el futuro.

MÉTODOS DE CONTENCIÓN DE POZOS EN ALTA MAR

Los avances en la prevención de explosiones incluyen el control continuo de los parámetros del pozo con sistemas que alerten a los operadores sobre cualquier posible amenaza a su integridad. Entre los parámetros bajo control se encuentran las barreras de pozo, que son sistemas o dispositivos que contienen fluido o presión dentro del pozo. Las normas de perforación exigen el mantenimiento continuo de al menos dos barreras independientes para evitar que una simple falla provoque un derrame.

Si fallan las medidas de control primarias y secundarias del pozo, se han desarrollado diversas actividades adicionales de control de la fuente. Un ejemplo es una chimenea de sellado submarina (consulte la figura 4) y la contención, que consiste en instalar una chimenea de sellado en el pozo y cerrar sus válvulas para cortar el flujo de petróleo lo antes posible.

DETECCIÓN DE FUGAS

Los avances en teledetección han impulsado el desarrollo de nuevas herramientas que permiten la detección temprana de fugas en oleoductos, el cierre rápido del flujo de petróleo y la reparación o sustitución del segmento afectado para reducir la cantidad de petróleo perdido. Ejemplos de estas técnicas de detección de fugas incluyen detección acústica, sensores de fibra óptica, análisis del punto de presión, tasa de cambio o tasa de cambio condicional, modelado dinámico, muestreo de vapor, termografía infrarroja, procesamiento digital de señales y técnica de balance masa-volumen, entre otras.



FIGURA 4 Chimenea de sellado.

NOTAS: Desarrolladas en respuesta al derrame de petróleo de *Deepwater Horizon*, las chimeneas de sellado se mantienen en una ubicación en tierra cerca de los sitios de perforación en alta mar. Están diseñadas para cortar el flujo de petróleo en caso de falla de otros sistemas, como el dispositivo de prevención de explosiones.

FUENTE: Oil Spill Response Limited.

RECOMENDACIÓN

Prevención de entradas de petróleo antropogénico al mar

Durante la transición hacia fuentes de energía más renovables, la industria y las agencias federales y estatales deben implementar las siguientes recomendaciones para prevenir futuros derrames en aguas de América del Norte, junto con sus efectos reales y percibidos:

- De acuerdo con informes anteriores, el Gobierno y la industria deben continuar sus esfuerzos para desarrollar y aplicar tecnologías y mejores prácticas para prevenir y reducir la magnitud de los derrames accidentales de oleoductos e instalaciones terrestres y marinas y del transporte marítimo. El comité reconoce el riesgo de complacencia tras períodos de derrames reducidos y aconseja al Gobierno y a la industria que mantengan la vigilancia.
- El Gobierno debe revisar si se han aplicado las recomendaciones técnicas que surgieron de las investigaciones exhaustivas realizadas después del incidente de *Deepwater Horizon* respecto a los dispositivos de prevención de explosiones, así como las cuestiones operativas y la cultura de seguridad, e identificar aquellas que aún no se han implementado, pero podrían implementarse.



Respuesta ante derrames de petróleo

A pesar de los esfuerzos para prevenir derrames de petróleo, los derrames accidentales seguirán ocurriendo mientras exista la producción y el transporte de petróleo en alta mar. Se podrían emplear diversas técnicas de respuesta durante un derrame de petróleo, como recuperación mecánica del petróleo, quema en el sitio y uso de dispersantes (consulte la figura 5). En conjunto, estas técnicas pueden considerarse herramientas de respuesta ante derrames de petróleo, listas para ser implementadas y así reducir los posibles impactos de un derrame en las personas, los animales y el medioambiente.

Herramientas de respuesta ante derrames de petróleo

Existen diversas técnicas, que se enumeran a continuación, para responder ante derrames de petróleo. Siguiendo con la analogía de una caja de herramientas, es necesario elegir la herramienta adecuada para cada tarea. Ninguna técnica

FUENTE DE LA IMAGEN: Administración Nacional Oceánica y Atmosférica.

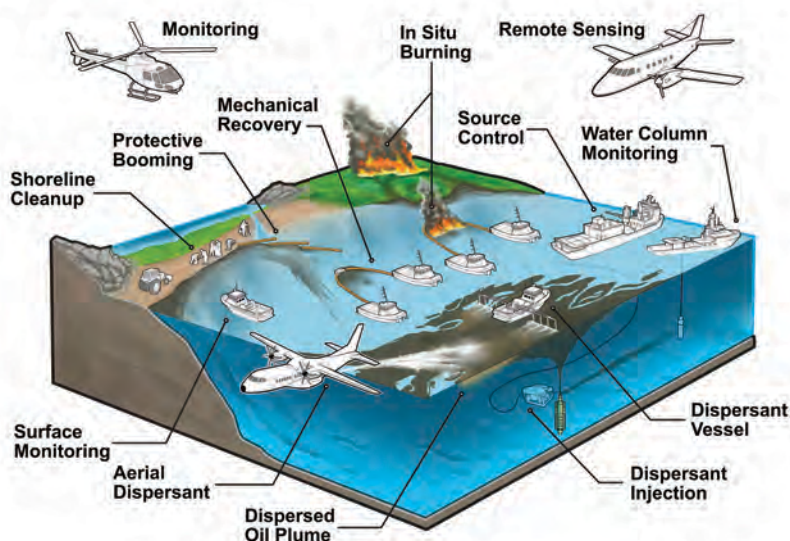


FIGURA 5 Técnicas de respuesta ante derrames de petróleo.

FUENTE: Imagen cortesía del Instituto Estadounidense del Petróleo, producida por Iron Octopus Productions, Inc.

de respuesta ante derrames de petróleo es eficaz, segura ni necesaria en todas las situaciones. Cada una presenta sus propias ventajas, desafíos y condiciones operativas óptimas. Elegir las herramientas de respuesta más adecuadas implica considerar factores como el tipo de petróleo, la ubicación del derrame, la profundidad del agua, la temperatura y la velocidad del viento. También deben tomarse en cuenta los aspectos medioambientales y socioeconómicos, por lo que las técnicas elegidas no deben causar daños mayores. De ser necesario, se pueden utilizar los procesos de análisis del beneficio medioambiental neto o la evaluación de la mitigación del impacto del derrame para comparar las opciones de respuesta y seleccionar la combinación óptima de actividades para limpiar un derrame de petróleo.

HERRAMIENTAS DE CONTROL Y EVALUACIÓN

Las herramientas de control y evaluación se utilizan para recopilar información crítica sobre un derrame de petróleo, lo que incluye las características físicas y químicas del petróleo, la ubicación y extensión del derrame y las condiciones medioambientales. Estos criterios se utilizan para seleccionar las herramientas de respuesta más adecuadas. Gran parte de esta información se recopila mediante sensores que realizan observaciones visuales y químicas

del petróleo sobre y bajo la superficie del océano. Los sensores se desplazan por el medioambiente mediante plataformas de control, que pueden incluir instrumentos anclados y equipos lanzados desde embarcaciones de superficie y subsuelo. Un componente esencial de la respuesta ante derrames de petróleo es la teledetección, en la que sensores a bordo de aeronaves, embarcaciones o satélites rastrean los derrames de petróleo a distancia (consulte la figura 6).

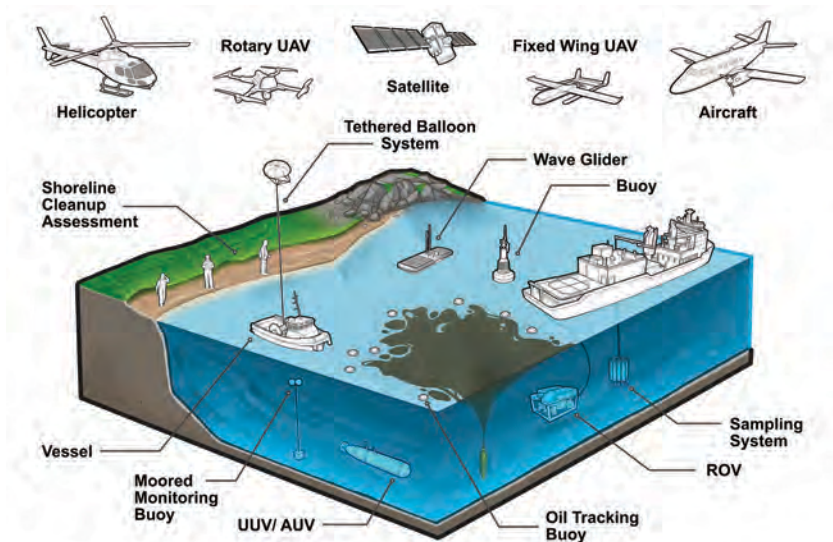


FIGURA 6 Plataformas de teledetección donde se pueden colocar sensores para la vigilancia de derrames de petróleo.

NOTA: AUV = vehículo submarino autónomo (autonomous underwater vehicle); ROV = vehículo operado remotamente (remotely operated vehicle); UAV = vehículo aéreo no tripulado (unmanned aerial vehicle); UUV = vehículo submarino no tripulado (unmanned underwater vehicle).

FUENTE: Imagen cortesía del Instituto Estadounidense del Petróleo, producida por Iron Octopus Productions, Inc.

RECUPERACIÓN MECÁNICA

Por medio de la recuperación mecánica se retira en físico el petróleo derramado de la superficie del agua (consulte la figura 7). Se utilizan técnicas de teledetección para identificar manchas de petróleo más gruesas, que son más fáciles de manejar por vías mecánicas que las capas delgadas. Luego, el petróleo se concentra en capas gruesas mediante barreras flotantes especialmente diseñadas, llamadas barreras flotantes, que son remolcadas por embarcaciones. Los dispositivos de colado en el vértice de la barrera separan el petróleo del agua y lo transportan a un almacén antes de ser transferido a tierra para su reciclaje o

eliminación. Cuando los derrames se producen en alta mar o cuando hay vientos u olas fuertes, es posible que la recuperación mecánica no sea eficaz para recuperar grandes volúmenes de petróleo. Además, la recuperación mecánica requiere mucho más personal, equipo y un apoyo logístico complejo durante un largo período que cualquier otra técnica de respuesta.

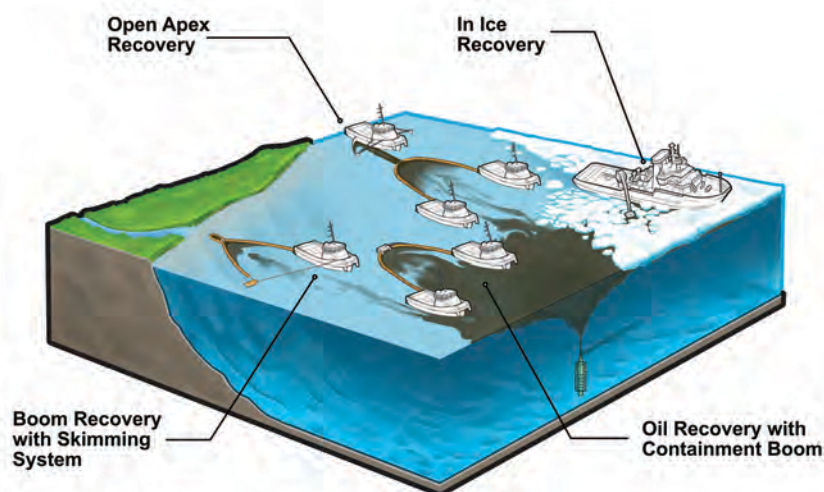


FIGURA 7 Configuraciones de recuperación mecánica.

FUENTE: Imagen cortesía del Instituto Estadounidense del Petróleo, producida por Iron Octopus Productions, Inc.

QUEMA EN EL SITIO

Consiste en la quema controlada de una mancha de petróleo para reducir la cantidad de petróleo flotante, prevenir los riesgos asociados para la salud y la seguridad humana y minimizar el impacto medioambiental del petróleo (consulte la figura 8). Un factor crucial para el éxito de la quema en el sitio es el espesor de la mancha. Para facilitar la combustión del petróleo, este debe concentrarse en capas gruesas mediante barreras especiales, de forma similar al proceso de recuperación mecánica. Recientemente, se ha probado el uso de productos químicos que aglutinan el petróleo —que hacen que las manchas de petróleo se contraigan en capas más pequeñas y gruesas— en experimentos de laboratorio y de campo.

Décadas de investigación y respuestas de campo han demostrado que la quema en el sitio puede ser una valiosa herramienta de respuesta para la extracción de grandes volúmenes de petróleo de forma rápida, segura y eficaz, con un impacto medioambiental mínimo. La quema en el sitio exitosa también elimina la necesidad de recolectar, almacenar, transportar y desechar el petróleo recuperado, como sería el caso con la recuperación mecánica. Durante la respuesta de DWH, se realizaron con seguridad más de 400 quemas controladas, extrayendo entre 222.000 y 310.000 barriles de petróleo de la superficie del golfo de México. La quema en el sitio también es una de las pocas técnicas de respuesta eficaces en condiciones árticas.

DISPERSANTES

Las técnicas de respuesta, como la recuperación mecánica y la quema en el sitio, requieren el despliegue de mucho personal de campo y equipo y enfrentan el desafío de recolectar y concentrar manchas de petróleo dispersas e irregulares. Es posible que estas técnicas no sean tan eficaces para recuperar grandes derrames en alta mar en zonas remotas o en condiciones de vientos fuertes y mar turbulento. En estas situaciones, la aplicación de dispersantes desde el aire o desde una embarcación puede ser una herramienta de respuesta crucial (consulte la figura 9).

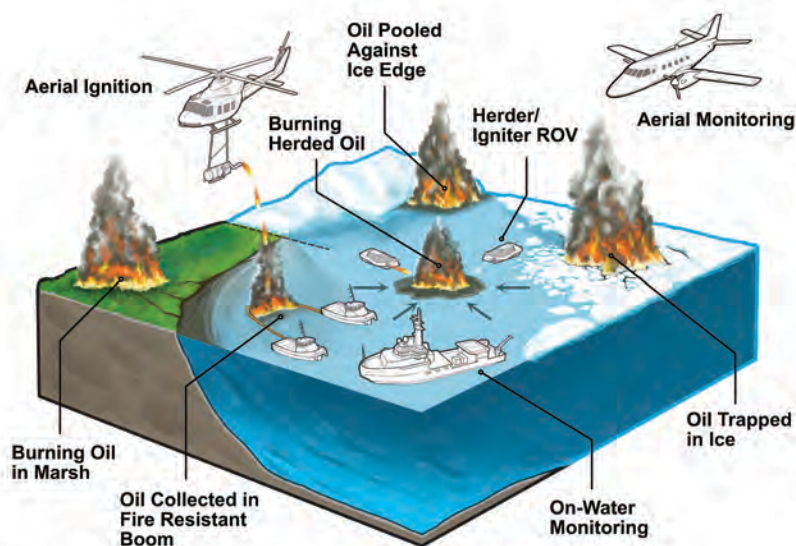


FIGURA 8 Tácticas de quema en el sitio como técnica de respuesta ante derrames de petróleo. FUENTE: Imagen cortesía del Instituto Estadounidense del Petróleo, producida por Iron Octopus Productions, Inc.

Los dispersantes son mezclas químicas que ayudan a mejorar el proceso natural de dispersión del petróleo: su desintegración en pequeñas gotas y la dispersión de las gotas de petróleo en la columna de agua. Los dispersantes funcionan reduciendo la tensión superficial entre el agua y el petróleo, lo que facilita que las olas u otras turbulencias creen pequeñas gotas de petróleo y las disipen. Estas gotas se diluyen rápidamente en la columna de agua y son biodegradadas por las bacterias presentes de forma natural.

Los dispersantes químicos son más eficaces cuando se aplican durante o inmediatamente después de un derrame. Los procesos naturales como la dilución, la meteorización y la emulsificación del petróleo pueden reducir la eficacia de los dispersantes. Los dispersantes se pueden utilizar en una variedad más amplia de condiciones marinas que otras condiciones de respuesta y constituyen la única técnica de respuesta que puede emplearse en casos de olas y vientos fuertes.

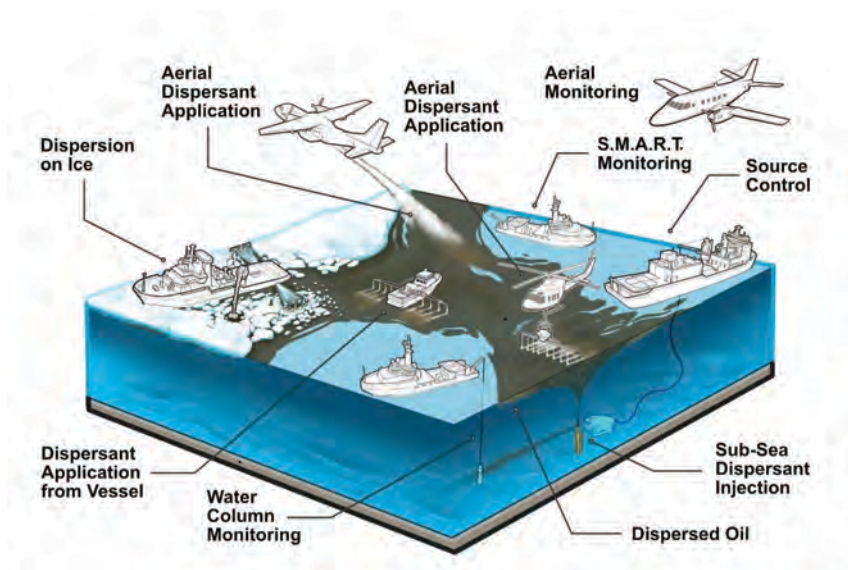


FIGURA 9 Métodos de aplicación de dispersantes y técnicas de control.

FUENTE: Imagen cortesía del Instituto Estadounidense del Petróleo, producida por Iron Octopus Productions, Inc.

La aplicación de dispersantes en la fuente de las explosiones submarinas es el método de aplicación más reciente que promete tratar grandes volúmenes de petróleo en la fuente con alta eficiencia. Esta técnica, denominada inyección submarina de dispersantes (subsea dispersant injection, SSDI), se utilizó por primera vez como una opción de respuesta importante durante el derrame de DWH. Además de mejorar la dispersión natural del petróleo liberado en la columna de agua, la SSDI también limita la cantidad de petróleo que llega a la superficie del mar, donde puede suponer un peligro para las personas (incluidos los operadores de las embarcaciones de control de fuentes que trabajan para cerrar el pozo y detener la liberación de petróleo al medioambiente), los mamíferos marinos, las aves y otras especies marinas.

Sin embargo, no todos los petróleos son aptos para la dispersión química. Los petróleos muy volátiles se evaporan rápidamente y, por lo general, se les permite hacerlo. Los petróleos muy pesados con una densidad superior a la del agua no son aptos para la dispersión, y los petróleos que se han enfriado por debajo de su punto de fluidez (la temperatura a la que el petróleo permanece líquido) pueden volverse muy viscosos y perder su capacidad de dispersión.

Además, la aplicación de dispersantes conlleva la posibilidad de tener impactos negativos en el medioambiente. Por ejemplo, el uso de dispersantes aumenta temporalmente la concentración de petróleo en la columna de agua antes de que la columna de petróleo disperso se diluya. Esto podría exponer a los organismos en la parte superior de la columna de agua a mayores concentraciones de petróleo. El petróleo disperso por medios químicos o de forma natural en aguas con alta turbidez y contenido de sedimentos podría provocar la formación de nieve marina de petróleo (un sedimento que se forma cuando el petróleo se mezcla con animales muertos, plantas, hollín y polvo; consulte “Información sobre el destino del petróleo proporcionada por el derrame de petróleo de la plataforma *Deepwater Horizon*” en la Sección 5). Además, el proceso de aplicación de dispersantes podría provocar el contacto de los trabajadores con sus sustancias químicas.

GESTIÓN DE LA RESPUESTA ANTE DERRAMES DE PETRÓLEO:

SISTEMA DE COMANDO DE INCIDENTES

En la década de 1970, California fue devastada por una serie de incendios forestales catastróficos que invadieron el territorio urbano. Al investigar estos incidentes, se descubrió que las fallas en la respuesta a los incidentes eran mucho más probables debido a una gestión inadecuada en vez de a la falta de recursos, tácticas deficientes u otros factores. Esta información condujo al desarrollo del sistema de comando de incidentes (Incident Command System, ICS), una herramienta utilizada para el comando, control y coordinación de la respuesta de emergencia ante desastres mayores, que incluyen derrames de petróleo. El ICS proporciona una estructura de gestión que permite a las agencias y a la industria trabajar en conjunto utilizando terminología y procedimientos operativos comunes para controlar el personal, las instalaciones, los equipos y las comunicaciones. El sistema representa las “mejores prácticas” organizacionales y se ha convertido en la norma para la gestión de emergencias en todo Estados Unidos.

Protección y limpieza de la costa

Los mayores impactos para las personas y el medioambiente se producen cuando el petróleo llega a la costa, que suele estar densamente poblada y alberga actividades recreativas, pesqueras, industriales y turísticas. También suele albergar numerosos peces, animales, plantas y microbios en ecosistemas con un equilibrio delicado.

Se han desarrollado numerosas herramientas de respuesta ante derrames de petróleo para la respuesta costera (consulte la figura 10), pero también pueden causar impactos negativos en el medioambiente costero. Por lo general, implican el desplazamiento de un gran número de personas y equipos a una zona durante largos períodos, lo que genera grandes volúmenes de residuos. Un ejemplo es el uso de barreras diseñadas para evitar que el petróleo llegue a la costa, cuyo despliegue requiere tiempo y su colocación debe ser cuidadosa, ya que pueden desviarse hacia zonas costeras sensibles. En la respuesta al derrame de petróleo de DWH, los largos tramos de barreras no lograron detener la llegada del petróleo a la costa y generaron impactos adicionales al ser empujadas hacia las marismas, lo que requirió complejas operaciones de recuperación.

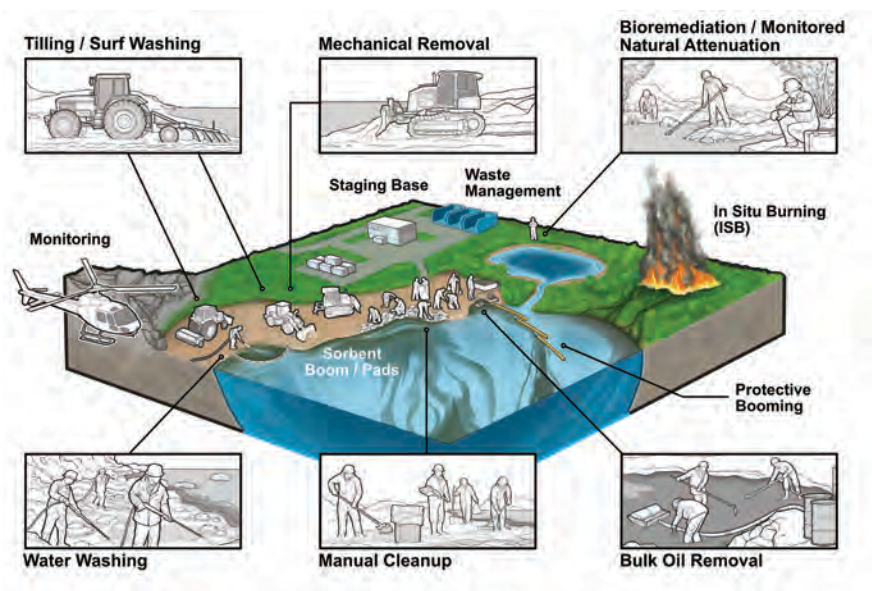


FIGURA 10 Ejemplos de operaciones de respuesta ante derrames de petróleo en la costa.

FUENTE: Imagen cortesía del Instituto Estadounidense del Petróleo, producida por Iron Octopus Productions, Inc.

EQUILIBRIO ENTRE LA RESPUESTA Y EL IMPACTO

La elección de la técnica de respuesta ante un derrame de petróleo siempre implica un equilibrio entre la eficacia, la rapidez, la seguridad y el impacto medioambiental de la limpieza (consulte la figura 11). La eliminación completa del petróleo puede no ser el resultado deseado si dicho grado de eliminación daña la flora y la fauna y causa estrés a las especies vulnerables. En algunos casos, incluso las mínimas actividades de limpieza humana pueden afectar el comportamiento alimentario de ciertas especies, como aves amenazadas o en peligro de extinción o tortugas anidadoras. Según la situación, la mejor opción puede ser no responder en absoluto. Por ejemplo, un derrame de combustible ligero de tamaño entre pequeño y mediano en alta mar puede evaporarse o dispersarse de forma natural, sin necesidad de una limpieza activa.

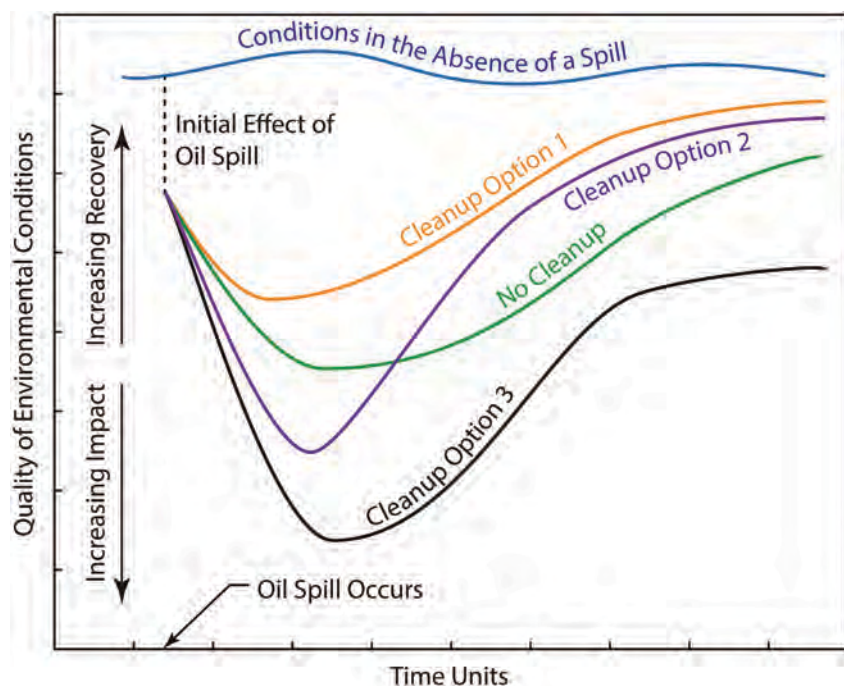


FIGURA 11 Este modelo conceptual ilustra la compensación entre los posibles impactos medioambientales y el tiempo de recuperación (derivado del modelado y la experiencia) de varias opciones de limpieza. Las opciones de limpieza 1 y 2 ofrecen un tiempo de recuperación más corto, mientras que la opción 3 ofrece un tiempo de recuperación más largo y un mayor impacto en el medioambiente. Con el tiempo, todas las opciones de recuperación, incluso no realizar ninguna limpieza, se aproximan a las condiciones previas al derrame.

FUENTE: Adaptado de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica.

RECOMENDACIÓN

Herramientas de respuesta

Se deben introducir mecanismos regulativos para fomentar la evaluación, la autorización y el despliegue de nuevas técnicas avanzadas de respuesta cuando estén disponibles. El uso de estas técnicas durante la respuesta ante emergencias reales se debe guiar por el escenario específico para garantizar que añadan valor y maximicen la protección de la salud, la seguridad, el medioambiente, la cultura y la socioeconomía.

RECOMENDACIÓN

Integración de la ciencia con la respuesta

Las agencias responsables competentes deben planificar formas eficaces de respuesta científica rápida ante derrames de petróleo para que los científicos puedan movilizarse sobre el campo rápidamente y de manera concertada con las operaciones de respuesta. Esto debe implicar una comunicación y aprobaciones rápidas entre todas las partes para definir la dirección científica pertinente desde el punto de vista operativo y recopilar información relevante para la toma de futuras decisiones con respecto a la minimización de los efectos del derrame.

De cara al futuro: necesidades de respuesta ante el derrame futuro de petróleo

En los próximos años, es probable que el panorama energético cambiante presente los siguientes nuevos desafíos para la respuesta ante derrames de petróleo.

RESPUESTA ANTE DERRAMES DE PETRÓLEO EN CONDICIONES ÁRTICAS

El medioambiente ártico presenta desafíos únicos para la limpieza de derrames de petróleo, que incluyen horas de luz solar limitadas durante el invierno, días frecuentes con niebla, fuertes ráfagas de viento y bajas temperaturas. La infraestructura limitada representa otro obstáculo para las operaciones de campo: por encima del círculo polar ártico en América del Norte no hay conexiones ferroviarias y solo hay dos puertos de aguas profundas y cuatro aeropuertos. Además, hay muy pocos asentamientos en el Ártico, lo que dificulta el alojamiento del personal de respuesta.

Estos desafíos logísticos, junto con los grandes volúmenes de residuos que generarían las actividades de limpieza y la perturbación medioambiental causada por el aumento de la presencia humana, significan que la atenuación natural controlada podría superar los beneficios de la limpieza (consulte el recuadro 3).

RESPUESTA ANTE DERRAMES DE NUEVOS TIPOS DE COMBUSTIBLE

En 2020 entraron en vigor nuevos requisitos para combustibles con bajo contenido de azufre para el transporte marítimo. Sin embargo, hasta la fecha, no se han realizado suficientes investigaciones sobre estos combustibles para determinar

RECUADRO 3**Atenuación natural controlada**

La atenuación natural se refiere al conjunto de procesos naturales que descomponen el petróleo en el medioambiente, transformándolo y eliminándolo del ecosistema. Estos procesos incluyen dispersión, evaporación, sedimentación, dispersión natural, fotooxidación y biodegradación. Cuando se combina con un sistema de muestreo y medición, se denomina atenuación natural controlada.

su comportamiento en el transporte y la meteorización, su biodegradabilidad y su toxicidad en diversas condiciones medioambientales. Las pocas muestras de combustibles con muy bajo contenido de azufre (very low sulfur fuel oil, VLSFO) y ultrabajo contenido de azufre (ultra-low sulfur fuel oil, ULSFO) que se han estudiado hasta la fecha presentan propiedades químicas diferentes.

Si bien la transición a energías alternativas y renovables reducirá en última instancia la contaminación por petróleo en el mar, las fuentes de energía y los combustibles alternativos pueden generar sus propios problemas de seguridad y contaminación. La comunidad reguladora y de investigación, así como la industria, deberán revisar y abordar de forma proactiva cualquier posible efecto adverso derivado de estas transiciones.

RECOMENDACIÓN**Nuevos productos y tipos de combustible**

El Gobierno debería financiar la investigación necesaria para estudiar la composición, la toxicidad y el comportamiento de los nuevos tipos de combustibles marinos (p. ej., combustible con bajo contenido de azufre, combustibles con ultrabajo contenido de azufre, biocombustibles) y productos derivados del petróleo (p. ej., bituminosos diluidos), de modo que se pueda comprender el destino y los efectos de estos productos y planificar y ejecutar las operaciones de respuesta de la manera más eficaz para reducir los impactos.

Brechas en la investigación: control de fuentes y respuesta ante derrames de petróleo

Se requiere la siguiente investigación en las áreas de control de fuentes y respuesta ante derrames de petróleo.

EXPERIMENTOS DE CAMPO CON PETRÓLEO REAL PARA PROBAR Y MEJORAR LAS TÉCNICAS DE RESPUESTA EN CONDICIONES REALISTAS

Si bien algunos experimentos pueden llevarse a cabo de manera eficaz en el laboratorio o con sustitutos de petróleo, los experimentos de campo con petróleo real serían más eficaces para probar y optimizar las técnicas de respuesta en condiciones realistas.

ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE DERRAMES DE PETRÓLEO DE DIFERENTES ESCENARIOS DE RESPUESTA

Muchos proyectos de investigación solo analizan un componente muy pequeño del destino, del comportamiento, de los impactos o de las opciones de respuesta del petróleo en condiciones y escenarios específicos. Esta especificidad dificulta que quienes toman las decisiones saquen conclusiones generales sobre cómo los diferentes escenarios de respuesta pueden afectar el destino, el comportamiento o los impactos del petróleo.

COMPRENSIÓN DE LOS RIESGOS MÉDICOS Y PSICOLÓGICOS PARA LOS PROFESIONALES DE RESPUESTA

El equipo de respuesta ante derrames de petróleo está capacitado y utiliza estrategias y equipos de protección personal adecuados, pero su exposición al petróleo y los riesgos de las operaciones de respuesta pueden afectar su salud física y mental.



Destinos: ¿a dónde va el petróleo?

Cuando el petróleo se derrama en el océano, una serie de procesos físicos, químicos y biológicos determinan su destino. Debido a que muchos componentes del petróleo no se mezclan con el agua de mar y son más ligeros que esta, los derrames de petróleo forman manchas en la superficie y gotas (o burbujas en el caso del gas natural) en la columna de agua del océano. El petróleo puede hundirse al fondo al adherirse a partículas más pesadas. Las interacciones entre el petróleo y el agua de mar, los organismos marinos y la atmósfera modifican la composición y las propiedades físicas del petróleo y comienzan a descomponerlo. Dado que estos procesos modifican la composición química del petróleo, sus propiedades físicas también pueden cambiar, lo que altera su destino medioambiental. Los principales procesos se enumeran en la tabla 2 y se muestran en la figura 12.

FUENTE DE LA IMAGEN: Administración Nacional Oceánica y Atmosférica.

TABLA 2 Procesos principales que afectan el destino del petróleo

Proceso	Definición	Condiciones propicias
Propagación en el agua	Movimiento del petróleo en la superficie del mar que crea charcos delgados y flotantes de manchas y brillos.	Los petróleos de baja viscosidad se dispersan más rápidamente que los de alta viscosidad.
Dispersión	Incorporación del petróleo derramado al agua de mar.	La concentración de petróleo disminuye a medida que este se mezcla con el agua de mar, y el grado de mezcla se ve influenciado por la turbulencia y las corrientes oceánicas.
Aerosolización	Transferencia de petróleo líquido del mar a la superficie y a la atmósfera mediante la formación de partículas.	Viento, olas y formación de capas blancas.
Emulsificació	Formación de una mezcla compuesta por pequeñas gotas de petróleo y agua.	Cantidad de petróleo en la superficie del mar, acción del viento y las olas (turbulencia) y uso de dispersantes.
Evaporación	Transferencia de la mancha o sustancias más volátiles de la mancha de petróleo al aire por vaporización.	Mayor superficie del petróleo expuesta al aire, alta proporción de compuestos volátiles en el petróleo, temperaturas cálidas, acción del viento y las olas (turbulencia).
Degradación microbiana	Metabolismo y degradación de compuestos orgánicos en el petróleo por microorganismos como bacterias.	Presencia de nutrientes, como nitrógeno y fósforo, y de una amplia gama de microorganismos.

Proceso	Definició	Condiciones propicias
Disolución	Transferencia de compuestos solubles en agua del petróleo al agua circundante.	Alta proporción de compuestos solubles en agua en el petróleo derramado, turbulencia y gran área interfacial entre el fluido de petróleo y el agua.
Fotooxidación	Reacciones químicas que ocurren en el petróleo en fase líquida y el petróleo meteorizado como resultado de la luz solar en presencia de oxígeno.	Petróleo en la superficie del agua, en la zona fótica y en costas y playas; luz solar; formación de radicales libres que, a su vez, reaccionan con el oxígeno para producir especies reactivas de oxígeno.

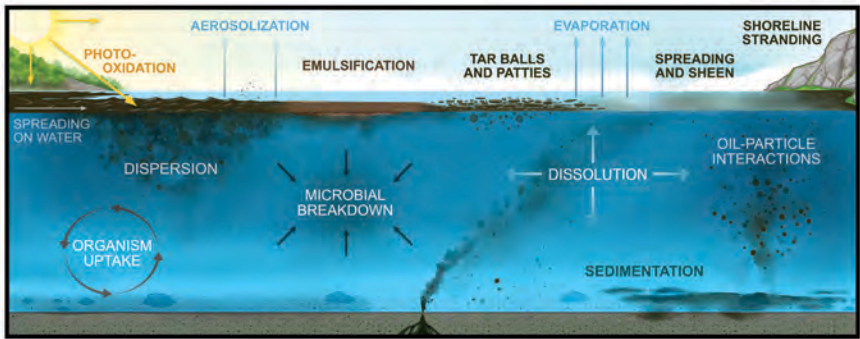


FIGURA 12 Resumen de los procesos que afectan el destino del petróleo en el mar.
FUENTE: Imagen cortesía del Instituto Estadounidense del Petróleo, producida por Iron Octopus Productions, Inc.

Avances recientes en la comprensión del destino del petróleo

Desde la publicación de *Petróleo en el mar, III edición* por el Consejo Nacional de Investigación en 2003, los siguientes avances tecnológicos importantes han mejorado nuestra capacidad de controlar y predecir el destino del petróleo derramado en el océano.

LA FOTOOXIDACIÓN COMO FACTOR IMPORTANTE EN EL DESTINO DEL PETRÓLEO

En las dos décadas pasadas, se ha producido un cambio de paradigma en la comprensión de la importancia de las reacciones fotoquímicas, es decir, cambios químicos en el petróleo causados por la luz solar, en el destino del petróleo derramado. Las observaciones y los experimentos realizados durante el derrame de petróleo de DWH, la disponibilidad de nuevos y sofisticados métodos químicos para analizar los productos de la reacción de fotooxidación y la combinación de los nuevos conocimientos resultantes con la investigación previa a 2003 han generado nuevos conocimientos que apuntan a la función de la fotooxidación en las primeras etapas de la meteorización y la descomposición de las manchas en el agua. También se ha demostrado que la fotooxidación afecta la arena y las rocas que recubren el petróleo en las costas y la vegetación de las marismas. Estos hallazgos han generado nuevas preguntas sobre la cantidad, la identidad, el destino y la toxicidad de los productos de la reacción de fotooxidación.

LA FUNCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS ÓMICAS EN EL ESTUDIO DE LAS COMUNIDADES MICROBIANAS EN EL MAR

Los avances revolucionarios en la secuenciación de ADN de alto rendimiento, el software bioinformático y las bases de datos de secuencias (denominados colectivamente tecnologías ómicas) han mejorado la capacidad de detectar y analizar las comunidades microbianas, que incluyen aquellas que afectan el destino del petróleo en el océano.

Las tecnologías ómicas se utilizaron ampliamente durante y después del incidente de DWH, lo que condujo a numerosos descubrimientos importantes, como la identificación de nuevas bacterias que degradan el petróleo, las vías metabólicas microbianas y una mayor comprensión de las comunidades microbianas y sus posibles cambios después de la entrada de petróleo.

El método clásico para identificar y enumerar microbios consiste en recolectar muestras y cultivar especies individuales en medios artificiales como clones, es decir, colonias en placas de agar. Este es un procedimiento lento, laborioso y altamente sesgado, que aísla menos del 1 % del total de microbios en una muestra (solo aquellos capaces de crecer en medios de laboratorio en cultivo puro). Con las técnicas ómicas, se puede estudiar la identidad y la actividad microbianas sin necesidad de cultivar organismos ni separarlos de sus comunidades vecinas. La velocidad también es un factor: con métodos de secuenciación de alto rendimiento y, recientemente, secuenciadores de ADN portátiles miniaturizados, los análisis que antes requerían el transporte de muestras, una importante infraestructura de laboratorio y días o semanas de adquisición de datos, ahora pueden realizarse en horas y utilizarse para el estudio casi en tiempo real de la estructura y la actividad de la comunidad (consulte el recuadro 4). Esto permite estudios temporales y espaciales repetidos de entornos dinámicos con replicación estadística.

INFORMACIÓN NUEVA SOBRE LAS COMUNIDADES MICROBIANAS INVOLUCRADAS EN LA BIODEGRADACIÓN DEL PETRÓLEO

Ciertos microbios ubicuos, en particular las bacterias, pueden biodegradar compuestos del petróleo, utilizándolos como sustratos de alta energía para su crecimiento (consulte el recuadro 5). Las comunidades microbianas han sido denominadas “primeros equipos de respuesta” ante los derrames de petróleo y, en condiciones adecuadas, pueden comenzar a degradar el petróleo en cuestión de horas o días. También pueden servir como “últimos equipos de respuesta”, al continuar biodegradando los componentes del petróleo que quedan después de que otros procesos naturales terminan y la intervención humana concluye.

Las muestras tomadas de la columna de petróleo dispersa en profundidad del derrame de DWH revelaron la magnitud de la biodegradación del petróleo en aguas frías y profundas del océano. La microbiota natural del golfo fue capaz de biodegradar de manera significativa varios componentes del petróleo en condiciones de baja temperatura y alta presión y llevó a cabo la degradación mucho más rápido de lo que se creía posible.

RECUADRO 4

Cómo se aplican los avances ómicos a las comunidades microbianas

Los ejemplos de cómo se han aplicado los avances ómicos a la microbiología incluyen:

1. Secuenciación de genes “marcadores” seleccionados, amplificados a partir de aislados cultivados o ADN de la comunidad, para inferir la identidad taxonómica o el potencial metabólico, a menudo, sin contexto genómico adicional para su interpretación.
2. Secuenciación del ADN total (genoma) de una sola especie para determinar propiedades como la taxonomía, el potencial bioquímico y la historia evolutiva. El ADN puede aislarse de una colonia cultivada o de una sola célula microbiana no cultivada, extraída físicamente de una comunidad en una muestra (genomas ensamblados de células individuales).
3. Secuenciación del ADN total de una comunidad microbiana y posterior uso de software para ensamblar genomas discretos de especies individuales ensamblados mediante metagenoma o para analizar genes marcadores seleccionados en la comunidad (metagenómica).
4. Aislamiento y secuenciación del ARN mensajero total de una especie (transcriptómica) o comunidad (metatranscriptómica) para discernir la actividad metabólica, en comparación con un estado metabólico basal.
5. Aislamiento y análisis químico de macromoléculas y moléculas pequeñas celulares, a saber, proteínas (proteómica), lípidos (lipidómica) o productos de vías bioquímicas (metabolómica), para derivar vías metabólicas.

RECUADRO 5

Microbios en el océano

El océano alberga una diversidad de microbios en una abundancia asombrosa: se estima que los océanos del mundo contienen 10^{29} células microbianas, una cifra que quizás supere en 100.000 veces la cantidad de estrellas del universo. Un solo mililitro de agua de mar puede albergar más de 100.000 células bacterianas, y la cantidad de virus marinos probablemente sea diez veces mayor. Los microbios abundan incluso en las profundidades oceánicas, permanentemente oscuras y frías, lo que incluye células longevas en antiguos sedimentos y abismos de las profundidades marinas como la fosa de las Marianas.

Información sobre el destino del petróleo proporcionada por el derrame de petróleo de la plataforma *Deepwater Horizon*

Antes de 2010, la mayoría de las observaciones de derrames de petróleo se centraban en el destino del petróleo derramado en la superficie del mar. Sin embargo, el derrame de petróleo de DWH ocurrió en aguas profundas, lo que destacó muchos comportamientos y destinos del petróleo en la columna de agua oceánica. A continuación, se presenta una información extraída de ese derrame.

IMPORTANCIA DE LOS PROCESOS DE FOTOOXIDACIÓN EN EL DESTINO DEL PETRÓLEO

Experimentos de laboratorio, muestreo y análisis de campo, observaciones de campo y modelado demostraron que, durante y después del derrame de petróleo de DWH, la fotooxidación de los compuestos de petróleo en la mancha superficial convirtió muchos compuestos en productos de reacción y representó un destino cuantitativo significativo para estos compuestos. Los productos de reacción pueden sufrir una mayor degradación por procesos microbianos u otros procesos biológicos, aunque esto aún no se ha determinado.

LA FÍSICA DEL “PETRÓLEO MUERTO” FRENTE AL “PETRÓLEO VIVO”

El petróleo liberado por el derrame de DWH estaba caliente y sometido a la alta presión de las profundidades marinas. Esto provocó que una gran fracción de los componentes normalmente gaseosos se disolviera en el petróleo líquido, por lo

que la mezcla resultante de petróleo y gas a alta presión se considera “petróleo vivo”. Asimismo, el “petróleo muerto” se refiere al petróleo líquido que ha liberado suficientes gases disueltos como para estar en equilibrio en condiciones estándar. Se han realizado importantes investigaciones en un amplio rango de temperaturas y presiones para comprender las interacciones del petróleo y el gas vivos con el mar. Los métodos para conectar las ecuaciones de estado con las propiedades del petróleo analizadas y los modelos que describen la rotura de burbujas y gotas han evolucionado en gran medida y se han utilizado datos de laboratorio para calibrar y validar estos nuevos modelos.

LOS EFECTOS DE LA SSDI

Además de utilizarse para disolver derrames de petróleo en la superficie, los dispersantes químicos también pueden emplearse en derrames submarinos para generar gotas de petróleo más pequeñas que puedan dispersarse en la columna de agua. Este método de aplicación de dispersantes a derrames submarinos —por lo general, cerca de la fuente de liberación— se conoce como inyección submarina de dispersantes (subsea dispersant injection, SSDI). Al reducir la tensión interfacial del petróleo liberado y el tamaño de las gotas, la SSDI ayuda a disipar los hidrocarburos disueltos en las profundidades marinas, lo que reduce la cantidad de compuestos volátiles que llegan a la superficie del mar y a la atmósfera. Falta demostrar la eficacia de la SSDI mediante investigaciones de laboratorio y ejercicios de modelado en diferentes condiciones de presión del pozo, profundidad, tipo de mezcla de gas y petróleo, tipo y régimen de dosificación del dispersante y condiciones oceanográficas físicas.

NUOVOS MODELOS PARA EL TAMAÑO DE LAS BURBUJAS Y LAS GOTAS

Un parámetro clave que controla el comportamiento del petróleo en el mar es el tamaño de las burbujas y las gotas. Los experimentos y los análisis posteriores al derrame de DWH han generado modelos predictivos del tamaño de las gotas en diversas condiciones de derrame, que incluyen el modelado de los efectos de los dispersantes.

IMPORTANCIA DE LOS AGREGADOS DE PETRÓLEO Y MINERALES EN LA INMERSIÓN Y EL HUNDIMIENTO DEL PETRÓLEO DEL POZO MACONDO 252 DEL DERRAME DE DWH

Si bien la función de las interacciones entre el petróleo y las partículas en la inmersión del petróleo se conoce desde hace décadas, los petróleos ligeros

se han considerado no hundibles. La presencia de altas concentraciones de partículas de arena en suspensión en la zona costera del golfo de México y su interacción con el petróleo meteorizado del pozo Macondo provocó que una proporción significativa del petróleo se sedimentara en el fondo marino en las aguas costeras poco profundas. Esto ilustró la importancia de los agregados de petróleo y minerales en la determinación del destino del petróleo.

LA FUNCIÓN DE LA NIEVE MARINA EN EL TRANSPORTE DEL PETRÓLEO DERRAMADO AL FONDO MARINO

La nieve marina es un fenómeno natural común en el mar y se produce cuando una lluvia de material orgánico —que incluye animales y plantas muertas, hollín y polvo— cae desde las capas superiores de las aguas a las profundidades marinas (consulte la figura 13). Cuando la nieve marina se mezcla con el petróleo, puede

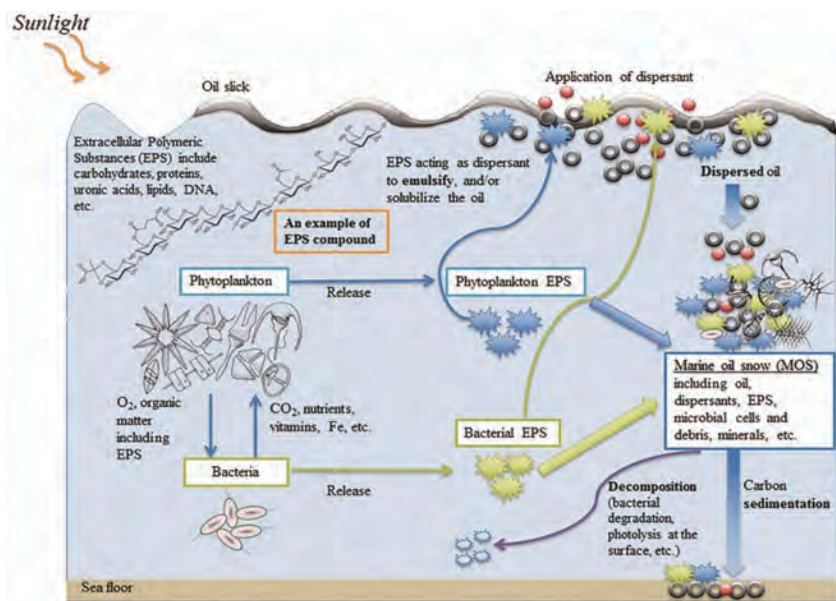


FIGURA 13 La nieve marina de petróleo se forma mediante la interacción de microbios, petróleo y dispersantes químicos con los carbohidratos, proteínas, lípidos y otras partículas del océano (denominadas colectivamente sustancias poliméricas extracelulares [extracellular polymeric substances, EPS]).

NOTA: Las EPS adsorben y dispersan el petróleo, mejorando así su solubilidad y biodisponibilidad, proporcionan una estructura física para que los microbios se agrupen y degraden el petróleo de manera eficiente y apan la materia coloidal y las partículas.

FUENTE: Quigg, A., U. Passow, W. C. Chin, C. Xu, S. Doyle, L. Bretherton, M. Kamalanathan, A. K. Williams, J. B. Sylvan y Z. V. Finkel. 2016. The role of microbial exopolymers in determining the fate of oil and chemical dispersants in the ocean. *Limnology and Oceanography Letters* 1(1):3–26. CC BY.

crear un sedimento llamado nieve marina de petróleo. Durante y poco después del derrame de DWH, se formó de manera rápida una cantidad inesperadamente grande de nieve marina de petróleo en las aguas superficiales contaminadas con petróleo del golfo de México, lo que tuvo una función fundamental en el destino del petróleo derramado y su transporte al fondo marino. La formación de la nieve marina de petróleo y su posterior sedimentación y acumulación de floculante (marine oil snow sedimentation and flocculent accumulation, MOSSFA) fue el primer evento significativo documentado de este tipo. Este proceso podría tener implicaciones para los derrames de petróleo tanto superficiales como subterráneos en otros lugares, ya que antes no se había considerado un destino significativo para el petróleo. Su importancia global y la función de la inyección de dispersantes subterráneos en MOSSFA aún no se han cuantificado

Brechas en la investigación: destino del petróleo en el mar

Si bien se han logrado avances significativos en muchos temas importantes relacionados con el destino del petróleo en el mar, persisten importantes brechas en la investigación.

CÓMO ESCALAR MODELOS PARA PREDECIR EL TAMAÑO DE BURBUJAS Y GOTAS EN EVENTOS EN EL CAMPO

Gracias a las nuevas instalaciones y métodos de laboratorio, se han logrado avances significativos en la medición de las distribuciones del tamaño de las gotas en la rotura del chorro y la dispersión del petróleo flotante, y estos datos se han utilizado para desarrollar y probar modelos de distribución del tamaño de las gotas de petróleo. Sin embargo, estos datos se generaron en experimentos de laboratorio a escala reducida, lo que impide recrear con precisión todos los parámetros de los derrames de petróleo en el campo. Por lo tanto, aún se necesitan datos de campo sobre la rotura y dispersión de petróleo y gas.

COMPLEJIDADES DE LAS REACCIONES FOTOQUÍMICAS Y FUNCIÓN DE LA ADICIÓN DE DISPERSANTES

Con la renovada apreciación de la fotooxidación como un proceso significativo que afecta la química del petróleo, se necesita más investigación para centrarse en las interacciones de los productos fotoquímicos con las propiedades físicas y químicas del petróleo, su comportamiento en la columna de agua y en las costas (p. ej., emulsificación y adherencia a superficies minerales) y su efecto en la biodegradación.

MECANISMOS DE LA BIODEGRADACIÓN ANAERÓBICA DE HIDROCARBUROS

La biodegradación aeróbica de los componentes del petróleo se ha estudiado exhaustivamente durante décadas, pero el alcance y la cinética de la biodegradación anaeróbica de hidrocarburos, pertinentes para los sedimentos del fondo marino y estuarinos, así como para los sedimentos costeros de grano fino, son menos conocidos.

CÓMO SE FORMA LA NIEVE MARINA DE PETRÓLEO Y SU IMPACTO EN EL MEDIOAMBIENTE

Las observaciones revelaron que parte de la respuesta biológica natural al derrame de petróleo de DWH resultó en la formación de grandes cantidades de nieve marina de petróleo asociada al petróleo en toda el agua. Sin embargo, los mecanismos que controlan la formación de nieve marina de petróleo y su impacto sobre el medioambiente siguen siendo en gran medida desconocidos.

COMPORTAMIENTO Y DESTINO DE LOS PETRÓLEOS NUEVOS O NO CONVENCIONALES

Se prevé que dos clases de petróleos no convencionales se transporten por buque en volúmenes cada vez mayores durante la próxima década: productos bituminosos diluidos (diluted bitumen, dilbit) y combustibles con bajo contenido de azufre (low sulfur fuel oil, LSFO) y con muy bajo contenido de azufre (VLSFO). Si bien se han realizado algunas investigaciones sobre el potencial de inmersión y hundimiento del dilbit en diversos entornos, aún no se ha producido un derrame marino importante de esta mezcla de dos componentes, y el destino del diluyente frente al dilbit meteorizado justifica una mayor experimentación a cielo abierto a gran escala para comprender mejor su posible comportamiento y destino.

TRANSFORMACIÓN DE NUEVOS CONOCIMIENTOS EN ALGORITMOS QUE PUEDAN MEJORAR LOS MODELOS DE DESTINO Y TRAYECTORIA DE LOS DERRAMES DE PETRÓLEO

A medida que mejora la comprensión del destino y el transporte del petróleo en el mar, los investigadores deberán convertir los nuevos conocimientos en algoritmos operativos para el modelado del destino y la trayectoria del petróleo, lo cual incluirá el desarrollo de nuevos algoritmos de modelado, la incorporación de estos nuevos algoritmos a los modelos y la validación de sus predicciones, idealmente mediante mediciones en el sitio.



Efectos: ¿qué daño puede causar el petróleo?

Cuando pensamos en el daño que causa el petróleo al medioambiente, nos imaginamos animales cubiertos de petróleo, como aves marinas, tortugas y mamíferos marinos. Una capa de petróleo interfiere con las propiedades aislantes del pelaje y las plumas de los animales, lo que puede provocar hipotermia y también afecta su capacidad para volar, nadar o evadir depredadores. Los animales pueden inhalar o ingerir el petróleo al intentar limpiarse, al tomar agua, al respirar en la superficie del mar o al comer presas contaminadas, lo que les causa efectos tóxicos.

Los efectos más graves de los derrames de petróleo en el mar suelen ocurrir en la superficie del mar o en las costas contaminadas. El petróleo vertido en el mar se limita principalmente a dos dimensiones, formando manchas superficiales que presentan peligros de contacto o ingestión para aves marinas, tortugas, mamíferos marinos y otros animales o plantas que habitan o transitan de manera rutinaria por la superficie del mar. Estos peligros han causado la muerte masiva de animales afectados, en especial, después de derrames de petróleo que contaminan aguas costeras altamente productivas.

FUENTE DE LA IMAGEN: Administración Nacional Oceánica y Atmosférica.

Las olas pueden dispersar las manchas de petróleo en la columna de agua y presentan riesgos de contacto e ingestión para peces y organismos que se alimentan por suspensión. Sin embargo, la mayoría de los petróleos flotan y pocas veces penetran más de unas pocas decenas de metros en la columna de agua y tienden a regresar a la superficie del mar en mares más tranquilos. Los componentes volátiles del petróleo presentan riesgos de inhalación para aves marinas, tortugas y mamíferos marinos, que pueden causarles la muerte. El petróleo arrastrado hacia las costas presenta riesgos de contacto o asfixia para los organismos que habitan o atraviesan la zona intermareal, lo que puede provocar la ingestión de petróleo o la asfixia

En contraste, los derrames de petróleo pocas veces provocan la muerte masiva de peces u otros organismos que habitan en aguas subterráneas. Esto se debe principalmente a que la mayoría de los componentes del petróleo no se disuelven con facilidad en el agua, y los que sí lo hacen suelen diluirse de manera rápida a concentraciones inferiores a los umbrales de toxicidad aguda. Esta rápida dilución resulta de la disolución de los componentes del petróleo de las manchas de petróleo, que suelen tener menos de 1 milímetro de espesor, en capas mixtas de columnas de agua que suelen tener decenas de metros o más de espesor, lo que indica factores de dilución del orden de 10.000 o más que se alcanzan con relativa rapidez. Sin embargo, incluso los componentes del petróleo diluidos pueden provocar diversos efectos adversos subletales en los organismos marinos.

En casos inusuales, como la explosión de DWH en 2010 en el norte del golfo de México, el petróleo puede combinarse con sedimentos u otra materia orgánica y hundirse hasta el fondo marino, donde se acumula y supone un peligro de contacto e ingestión para los organismos bentónicos.

Los efectos nocivos del petróleo pueden ir más allá de los efectos sobre un organismo o especie individual. La exposición al petróleo puede desencadenar una variedad de efectos a través de diferentes niveles tróficos dentro de un ecosistema. Por ejemplo, la contaminación por petróleo puede afectar la calidad del hábitat y reducir la disponibilidad de presas (consulte la figura 14). Las cadenas alimentarias también pueden verse alteradas si se eliminan los depredadores, como puede ocurrir cuando las aves marinas se contaminan con petróleo. Estos efectos pueden causar cambios a largo plazo en la estructura del ecosistema.



FIGURA 14 Mangles rojos contaminados por un derrame en la zona oriental del golfo de Paria, Trinidad y Tobago (17 de diciembre de 2013; 7554 barriles de combustible Bunker C).
NOTAS: La foto muestra el petróleo adherido a las raíces del manglar entre 3 y 4 semanas después del derrame (enero de 2014). Algunas hojas de manglar cambiaron de color verde a amarillo, lo que indica efectos subletales en este hábitat.
FUENTE: Con autorización de Paul Schuler, Oil Spill Response Limited.

Modos de exposición al petróleo

Los seres vivos pueden entrar en contacto con el petróleo a través de cuatro modos principales de exposición: contacto físico, ingestión, inhalación de componentes volátiles y gotas de petróleo o absorción de componentes disueltos (consulte la Figura 15). El petróleo puede causar daños a los seres vivos por contacto físico y por intoxicación con sus compuestos tóxicos. La vulnerabilidad de los organismos varía de forma considerable según la especie, la etapa de vida, el hábitat, el modo de exposición y los mecanismos tóxicos involucrados (consulte la tabla 3).

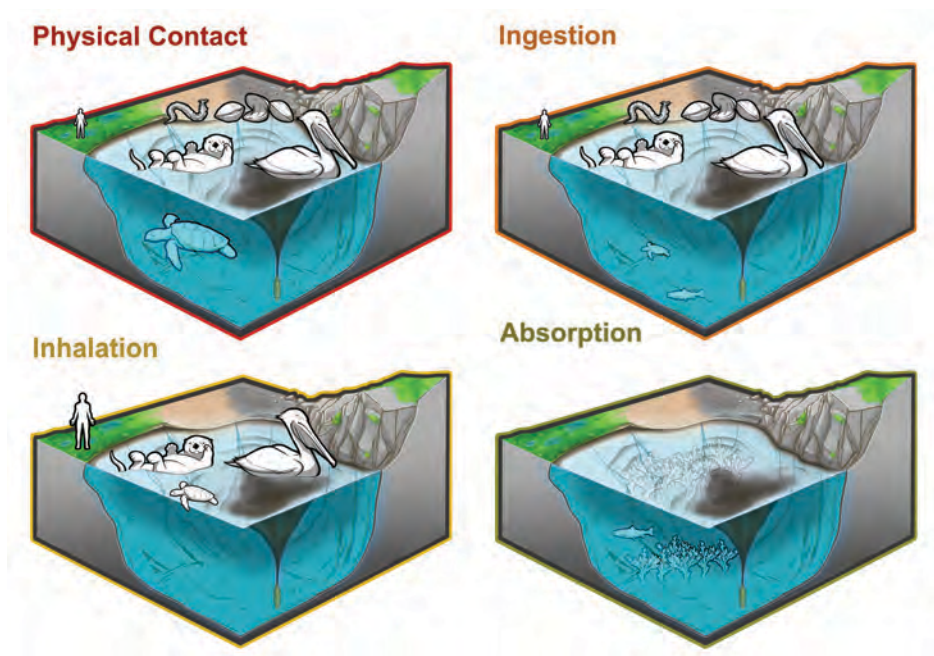


FIGURA 15 Riesgos para la vida marina de un vertido de petróleo.

TABLA 3 Resumen de los modos de exposición al petróleo, los mecanismos de toxicidad y los efectos de la exposición al petróleo

Mecanismo de toxicidad	Especies afectadas	Efectos de la exposición
Modo de exposición: contacto físico		
Las manchas y las capas superficiales de petróleo en el mar cubren los organismos con petróleo.		
Deficiencias en la movilidad	Aves marinas	El petróleo en las plumas de las aves interfiere con su capacidad de entrelazarse, lo que reduce su capacidad de vuelo. Esto podría resultar en: • reducción de la capacidad para evadir depredadores; • llegada tardía a las zonas de reproducción; • hipotermia y reducción de la masa corporal debido al mayor gasto de energía para volar.
Deficiencias en la termorregulación	Aves marinas, mamíferos marinos	Al recubrir el pelaje o las plumas de las aves marinas o los mamíferos marinos, el petróleo puede penetrar la capa de aire aislante junto a la piel, causando pérdida de calor. Esto podría resultar en: • hipotermia; • gasto de energía para mantener la temperatura corporal central; • mayor tasa de inanición, ya que la grasa corporal se utiliza para mantener la temperatura corporal.
Irritación dérmica	Aves, mamíferos marinos, peces	El contacto físico con el petróleo irrita la piel de la mayoría de los animales silvestres, provocando abrasiones y lesiones. Esto puede causar: • inflamación, ulceración, engrosamiento o descamación de la piel; • mayor susceptibilidad a infecciones; • incapacidad para oír o ver con normalidad.

Mecanismo de toxicidad	Especies afectadas	Efectos de la exposición
Asfixi	Aves, mamíferos marinos, tortugas marinas, plantas	El petróleo puede obstruir las fosas nasales y las vías respiratorias de los organismos y asfixiar a las plantas.
Modo de exposición: toxicidad por ingestión		
Los organismos pueden ingerir petróleo al intentar limpiarse, al beber agua al respirar en la superficie del mar o al comer presas contaminadas con petróleo.		
Daños en el tracto gastrointestinal	Aves, mamíferos marinos, peces	La ingestión de petróleo puede causar: • alteraciones significativas de la función gastrointestinal; • eliminación de la microbiota gástrica; • daño directo a los tejidos del tracto gastrointestinal.
Toxicidad hepática	Aves, mamíferos marinos, peces	El hígado elimina del cuerpo el petróleo ingerido, pero las vías metabólicas activadas pueden producir compuestos tóxicos y cancerígenos que causan un daño hepático significativo. La disminución de la función hepática puede causar: • alteraciones en los niveles de proteínas plasmáticas, lo que provoca disfunción inmunitaria; • disminución de la síntesis de proteínas y del metabolismo de carbohidratos y lípidos, lo que provoca una alteración de la homeostasis nutricional; • disminución de la producción de factores de coagulación, lo que aumenta el riesgo de lesiones; • deficiencias de la capacidad de desintoxicación.

Mecanismo de toxicidad	Especies afectadas	Efectos de la exposición
Disfunción renal	Aves, mamíferos marinos, peces	La exposición al petróleo causa disfunción renal, por sus efectos directos e indirectos de su ingestión, lo que causa inflamación intestinal, lo que deriva en deshidratación grave y, por consiguiente, daño renal. La disminución de la función renal puede causar: • alteraciones del equilibrio electrolítico sanguíneo, con efectos sobre la presión arterial; • disminución de la capacidad para eliminar desechos metabólicos; • reducción de la homeostasis; • debilitamiento generalizado.
Deficiencias del sistema inmunitario	Aves, mamíferos marinos	La exposición al petróleo se ha relacionado con cambios en la presencia y composición de glóbulos blancos, lo que reduce la función inmunitaria. Un sistema inmunitario debilitado puede resultar en la incapacidad de combatir infecciones bacterianas, fúngicas, virales o parasitarias.
Déficits neurológicos, que incluyen: • incapacidad para evitar depredadores; • incapacidad para buscar alimento; • disminución del esfuerzo reproductivo; • disminución de los hábitos migratorios.	Aves, mamíferos marinos	No está claro si los déficits neurológicos observados en animales contaminados con petróleo son el resultado directo de la exposición al petróleo o están relacionados con traumatismos, una nutrición inadecuada o disfunción hepática. Si los cambios se deben a la exposición al petróleo, los posibles mecanismos de toxicidad incluyen: • efectos directos de tipo narcótico de la exposición al petróleo en el sistema nervioso central; • alteraciones en los niveles de neurotransmisores en el cerebro; • cambios morfológicos directos en los tejidos neuronales.

Mecanismo de toxicidad	Especies afectadas	Efectos de la exposición
Deficiencias cardiovasculares	Aves, mamíferos marinos, peces	
Alteración del sistema hormonal		
Anemia		
Inhibición del crecimiento		

Modo de exposición: toxicidad por inhalación

Los mamíferos marinos, y probablemente las tortugas marinas, son vulnerables a los efectos tóxicos tras la inhalación de vapores de petróleo.

Privación de oxígeno y efectos tóxicos	Mamíferos marinos, seres humanos	La inhalación de la mezcla de gases sobre la mancha puede causar pérdida del conocimiento y ahogamiento. Esto se ha observado en trabajadores de la extracción de petróleo y gas, quienes han inhalado accidentalmente los vapores.
Daños al sistema respiratorio	Aves marinas, mamíferos marinos, seres humanos	

Modo de exposición: toxicidad por absorción

Los componentes del petróleo que se disuelven en la columna de agua pueden absorberse a través de la piel, el tracto gastrointestinal o las superficies respiratorias de los organismos acuáticos, y puede dañarlos al afectar su desarrollo cardiovascular y causar toxicidad fotointensificada

Toxicidad aguda	Todos los organismos acuáticos	La exposición a componentes del petróleo disueltos puede causar toxicidad a corto plazo que puede causar la muerte. La vulnerabilidad a esta toxicidad varía según la especie y la etapa de la vida.
Deficiencia cardiovascular	Peces, aves marinas, otros vertebrados	La exposición a componentes del petróleo puede causar problemas en el desarrollo del corazón.
Toxicidad fotointensificada	Se ha demostrado que más de 30 especies acuáticas son sensibles a la toxicidad fotointensificada, lo que incluye crustáceos, moluscos, oligoquetos y peces.	La producción de especies reactivas de oxígeno y radicales libres es catalizada por ciertos componentes del petróleo que se absorben en las células y luego se exponen a la luz ultravioleta. Esto causa estrés oxidativo, que básicamente quema los tejidos de adentro hacia afuera. El exceso de especies reactivas de oxígeno puede dañar los lípidos, los aminoácidos y el ADN/ARN dentro de las células.

Avances recientes en la comprensión de los efectos del petróleo en los ecosistemas

En los últimos 20 años, las siguientes tecnologías y herramientas moleculares han impulsado el estudio de la presencia, el destino y los efectos de los contaminantes medioambientales, incluido el petróleo.

MAYOR COMPRENSIÓN DE LAS VÍAS DE EXPOSICIÓN Y LOS DESAFÍOS

Nuevas técnicas moleculares analíticas y enfoques de prueba han proporcionado un amplio conocimiento sobre los factores que impulsan la toxicidad. Un ejemplo proviene de experimentos que detallan cómo la formación de gotas de petróleo puede influir en la toxicidad al proporcionar vías adicionales para que los ecosistemas se expongan al petróleo y mejorar la biodisponibilidad de sus componentes.

IDENTIFICACIÓN DE MECANISMOS DE ACCIÓN MEDIANTE LAS TECNOLOGÍAS ÓMICAS

Las herramientas ómicas pueden ayudar a identificar nuevos mecanismos de acción de la toxicidad y determinar los impactos del petróleo en organismos individuales. Por ejemplo, las herramientas ómicas se han utilizado para estudiar la epigenética —modificaciones de la molécula de ADN que afectan su disponibilidad, como la metilación del ADN—, lo que ha proporcionado información importante sobre las consecuencias a largo plazo de la exposición al petróleo para las generaciones futuras que no estuvieron directamente expuestas. La importancia de los cambios inducidos por el petróleo en el transcriptoma —el conjunto de genes que se transcriben en ARN— también se ha destacado a través de estudios ómicos.

AVANCES EN EL MODELADO PARA PREDECIR LOS EFECTOS

Los modelos integrados de trayectoria, destino y efectos muestran la evolución de los derrames de petróleo y las concentraciones de sus componentes, y pueden utilizarse para planificar las opciones de respuesta. Desde la publicación de *Petróleo en el mar, III edición* se han desarrollado nuevos modelos y los existentes se han actualizado y perfeccionado con base en los nuevos conocimientos. Los modelos actualizados se han utilizado para cuantificar el alcance del impacto del petróleo y para pronosticar la distribución de las gotas de petróleo y sus componentes, y también se han mejorado para su uso en zonas árticas.

Los nuevos modelos también se han utilizado para estimar la duración y el alcance de la exposición al petróleo para evaluaciones comparativas de riesgos que sirven de base para las decisiones sobre las compensaciones entre los recursos potencialmente afectados.

Brechas en la investigación: efectos del petróleo en el mar

Las siguientes áreas de investigación representan las necesidades más urgentes para comprender los efectos del petróleo en el mar.

TÉCNICAS DE EVALUACIÓN EN EL SITIO EN TIEMPO REAL

Para seguir avanzando en la comprensión de los efectos del petróleo en diferentes ecosistemas, los investigadores deberán desarrollar métodos para realizar evaluaciones en el sitio en tiempo real de especies y comunidades individuales expuestas al petróleo. Un ejemplo podría ser el desarrollo de sensores en el sitio para detectar petróleo e hidrocarburos de petróleo y para el análisis de imágenes de especies como el plancton, así como el uso de vehículos submarinos autónomos para determinar los efectos en la columna de agua.

ENFOQUE EN VÍAS Y MECANISMOS DE ACCIÓN POCO ESTUDIADOS

Se requieren mayores esfuerzos para comprender las vías de exposición poco estudiadas, como la inhalación en la interfaz aire-mar, y los mecanismos de acción que resultan de la exposición crónica de bajo nivel al petróleo. Por ejemplo, los mamíferos marinos y las tortugas marinas expuestos en la interfaz aire-mar pueden sufrir efectos subletales por la exposición al petróleo, lo que perjudicaría su capacidad de encontrar y capturar alimentos o evitar depredadores, pero podría no causar la muerte hasta meses después de la exposición, lo que lleva a subestimar las pérdidas de población.

EFFECTOS POCO ESTUDIADOS DE LA EXPOSICIÓN AL PETRÓLEO, COMO LOS QUE AFECTAN LAS INTERACCIONES TRÓFICAS Y LAS CADENAS ALIMENTARIAS

Cada vez hay más evidencia que sugiere que los efectos adversos generalizados sobre especies en peligro de extinción o que son componentes importantes de las cadenas alimentarias marinas, como las aves y los mamíferos marinos, pueden tener repercusiones sustanciales en otras especies y operar a través de fuertes vínculos tróficos o cascadas. Se podría lograr una mejor comprensión de

la estructura trófica en los sistemas marinos mediante un diseño experimental que incorpore poblaciones, interacciones tróficas comunitarias, múltiples factores de estrés e interrelaciones que permitan anticipar los efectos indirectos o en cascada de un derrame de petróleo.

INFLUENCIA DE LOS FACTORES CONJUNTOS DE ESTRÉS EN LA BIOACUMULACIÓN Y LA TOXICIDAD

A pesar de la comprensión mucho mejor de la función de diversos modificadores o factores conjuntos de estrés del medioambiente, se necesita más investigación. Por ejemplo, se necesitan más estudios para caracterizar la gama de productos de fotooxidación producidos por diversos petróleos y evaluar su persistencia, bioacumulación y toxicidad para organismos de prueba de toxicidad estándar. Se deberían incluir en estos estudios organismos adicionales y numerosos estadios de vida.

DIRECTRICES MEJORADAS Y AVANCES EN ESTUDIOS Y MODELOS DE TOXICIDAD

Tradicionalmente, las pruebas de toxicidad de laboratorio se han utilizado para intentar imitar o replicar las condiciones de campo durante un derrame, lo cual no es factible; sin embargo, han sido útiles para establecer umbrales de toxicidad para diversos taxones expuestos a numerosos tipos de petróleo (en



diferentes estados de meteorización), mezclas de hidrocarburos o componentes individuales de hidrocarburos. Estos datos se han utilizado para desarrollar y validar diversos efectos biológicos y modelos de toxicidad que predicen la toxicidad (en especial, en especies nuevas y poco estudiadas) y han sido útiles tanto en el proceso de evaluación nacional de daños a los recursos naturales como en la toma de decisiones sobre derrames de petróleo para determinar la mejor opción de respuesta. La forma en que se realizan y se informan estas pruebas define su utilidad; pueden producirse sobreestimaciones o subestimaciones de la toxicidad, según cómo se elaboren y verifiquen químicamente los medios de prueba, y cómo se realice y se informe el experimento. Estos problemas llevaron al desarrollo de un protocolo estandarizado que se publicó un par de años antes de la publicación de *Petróleo en el mar, III edición* (es decir, Respuesta química ante derrames de petróleo: Foro de Investigación de Efectos Ecológicos [Chemical Response to Oil Spills: Ecological Effects Research Forum, CROSERF]). Los nuevos conocimientos y avances técnicos que estudian los efectos biológicos (p. ej., la tecnología ómica), combinados con los avances en química analítica para caracterizar las exposiciones, justifican su asimilación para una mejor comprensión de los efectos.

Efectos de los derrames de petróleo en los seres humanos

El petróleo en el mar, así como las posteriores actividades de limpieza, también afecta a los humanos. De forma similar al marco “One Health” (Una Salud) en la ecología de las enfermedades infecciosas —donde se reconoce una mayor conciencia de cómo la interconexión entre el uso del suelo, el nivel socioeconómico y la resiliencia climática está directamente relacionada con los riesgos de enfermedades emergentes—, los efectos del petróleo en las personas son mucho más complejos y multifactoriales de lo que se creía antes. Por ejemplo, la contaminación por petróleo afecta la salud y el bienestar del equipo de respuesta ante derrames, así como a los habitantes locales y a las comunidades costeras al causar daños directos por la exposición a sustancias tóxicas. Sin embargo, los derrames de petróleo también tienen impactos en la salud mental, efectos conductuales y consecuencias económicas y sociales que perduran más allá de los efectos iniciales y más tangibles del derrame.



EFFECTOS DIRECTOS DE LA EXPOSICIÓN AL PETRÓLEO EN LA SALUD

Los efectos agudos del petróleo crudo incluyen irritación cutánea y ocular, mareos y otros efectos neurotóxicos, así como efectos en las vías respiratorias, como irritación de garganta y tos. Estos efectos se han informado en trabajadores de respuesta, así como en miembros de la comunidad, cuando los derrames se produjeron cerca de la costa.

RELACIÓN ENTRE LA EXPOSICIÓN AL PETRÓLEO Y LA INCIDENCIA DE CÁNCER

Dos de los componentes del petróleo crudo, el benceno y los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), son carcinógenos humanos conocidos, y los estudios han vinculado la exposición al petróleo crudo con la incidencia de cáncer. Uno de los estudios prospectivos más amplios sobre el cáncer en trabajadores expuestos al petróleo crudo es la cohorte de trabajadores petroleros en alta mar de Noruega. Comenzó en 1998 con base en cuestionarios que respondieron 27.917 trabajadores, de los cuales aproximadamente el 10 % eran mujeres. El principal hallazgo fue un aumento estadísticamente significativo en las tasas de incidencia estandarizadas de todos los cánceres, tanto en hombres como en mujeres.

TRACTO RESPIRATORIO

Varios investigadores han informado efectos a largo plazo en el tracto respiratorio, lo que incluye hallazgos de asma, alergias respiratorias y déficits en la función pulmonar. Tras el derrame de petróleo del buque *Prestige*, un estudio a largo plazo de una cohorte de pescadores que participaron en las labores de limpieza reveló una mayor prevalencia de síntomas en las vías respiratorias superiores e inferiores 1 año después del derrame.

EFFECTOS CARDIOVASCULARES

También se han sugerido efectos cardiovasculares a largo plazo. Un estudio del Instituto Nacional de Salud y Seguridad Ambiental de 24.375 trabajadores observó una asociación sugestiva entre la incidencia de infartos y la exposición individual a hidrocarburos totales durante el trabajo como equipo de respuesta, aunque no se consideró la función de los factores de estrés psicosocial en la incidencia de infartos.

EFFECTOS REPRODUCTIVOS Y DEL DESARROLLO

La evidencia toxicológica sugiere la posibilidad de toxicidad reproductiva y del desarrollo por los componentes del petróleo crudo, en particular los HAP, pero los estudios epidemiológicos sobre esta relación con los defectos congénitos no han sido concluyentes. Por ejemplo, estudios de casos-control que utilizaron la Base de Datos Nacional de Prevención de Defectos Congénitos para investigar defectos congénitos neurales o cardíacos en bebés, cuyas madres habían estado expuestas ocupacionalmente a HAP, revelaron cierta evidencia de una asociación entre la exposición a HAP y la espina bífida, pero no con otros defectos del tubo neural ni con cardiopatías congénitas. Aunque no es un hallazgo contundente, los estudios sugieren que los desastres que afectan a mujeres embarazadas pueden tener un impacto conductual en sus bebés, por lo que se justifica una evaluación más detallada de la posible toxicidad reproductiva y del desarrollo de las mezclas y componentes del petróleo crudo.

IMPACTOS EN LA SALUD MENTAL

Una extensa literatura documenta sin lugar a dudas los efectos mentales y conductuales en las personas directamente involucradas en cualquier desastre mayor, lo que incluye derrames de petróleo. Estos efectos comprenden altos niveles de trastorno de estrés postraumático, depresión y ansiedad. En la actualidad, una creciente evidencia indica que los grandes derrames de petróleo también pueden producir efectos mentales y conductuales en los miembros

de la comunidad que no tienen contacto directo con el petróleo crudo o sus componentes. Por ejemplo, estudios de comunidades costeras de Alaska afectadas por el derrame de petróleo del *Exxon Valdez* proporcionaron evidencia significativa de que la perturbación comunitaria afectó los efectos mentales y conductuales de sus miembros individuales. Otros estudios han mostrado efectos aditivos de la exposición a múltiples desastres, como el huracán Katrina y el derrame de DWH, en particular, en niños y adolescentes.

Las pérdidas económicas asociadas con los derrames de petróleo, como la suspensión de las industrias pesqueras, pueden ser factores significativos para la salud mental y conductual de la comunidad después de un derrame. Por ejemplo, un estudio comparó dos comunidades pesqueras: una directamente afectada por el derrame de petróleo de DWH (condado de Baldwin, Alabama) y la otra (condado de Franklin, Florida), que experimentó pérdidas de pesca y turismo, pero sin contaminación de la costa. El estudio no reveló diferencias en las medidas de angustia psicológica entre los residentes de estas dos comunidades en general, pero dentro de ambas comunidades, las personas que perdieron ingresos a causa del derrame sufrieron mucha más angustia psicológica que quienes tenían ingresos estables. Este hallazgo se mantuvo en un estudio de seguimiento realizado un año después del derrame de petróleo.

RECOMENDACIÓN

Efectos en la salud humana

Las agencias gubernamentales involucradas en la respuesta ante un derrame de petróleo deben mejorar la prioridad y la atención prestada a los efectos mentales y conductuales individuales y comunitarios y a las alteraciones socioeconómicas de la comunidad en los procesos de toma de decisiones y respuesta del sistema de comando de incidentes (ICS). La inclusión de la evaluación de la salud humana basada en la comunidad y las medidas de mitigación en el ICS es necesaria para proporcionar un enfoque más holístico con respecto a la salud humana y del ecosistema.

Brechas en la investigación: efectos de los derrames de petróleo en la salud de los seres humanos

Las siguientes áreas de investigación representan algunas de las necesidades más urgentes para comprender mejor y limitar los efectos de los derrames de petróleo en la salud humana.

MEJORAS EN LAS DIRECTRICES DE SEGURIDAD DE LOS MARISCOS

El principal impacto económico del derrame de petróleo de DWH y otros ha sido el cierre de la recolección de mariscos con el objetivo de proteger la salud humana. Es necesario comprender mejor las incertidumbres que existen con base en el riesgo para la reapertura de la recolección de mariscos en zonas oceánicas contaminadas y garantizar la comunicación transparente de esta información. La base para la reapertura de los recursos pesqueros se relaciona, en parte, con la evaluación de riesgos de la lista prioritaria de HAP de la Agencia de Protección Ambiental (Environmental Protection Agency, EPA), establecida hace varias décadas. La información nueva disponible sobre la química y la toxicología de las mezclas de HAP, así como el creciente reconocimiento del impacto del cierre de la recolección de mariscos en la salud comunitaria, indican la necesidad de reevaluar el riesgo para los humanos de ingerir mariscos tras un derrame de petróleo (el comité señala que investigaciones adicionales para reducir las incertidumbres podrían proporcionar la base científica para hacer que los criterios sean más o menos estrictos).

SE AMPLIARON LOS ESFUERZOS PARA ABORDAR LA SALUD HUMANA Y LA RESILIENCIA DE LA COMUNIDAD DESPUÉS DE LOS DERRAMES DE PETRÓLEO

Dar mayor importancia a la prevención de los efectos mentales y conductuales durante la respuesta a derrames de petróleo podría ayudar a fortalecer la resiliencia comunitaria ante estos derrames. Actualmente, el ICS desempeña una función fundamental en la respuesta a derrames de petróleo y establece prioridades estratégicas de respuesta (consulte el recuadro 4 en la página 39). Para fundamentar las decisiones del ICS y priorizar la salud mental y conductual de la comunidad, los científicos necesitarían desarrollar y validar medidas estandarizadas de salud mental y conductual de la comunidad equivalentes a las que se utilizan en la actualidad para las decisiones sobre ecosistemas.



Marco para el avance de la ciencia sobre los derrames de petróleo

En las dos décadas pasadas, se ha logrado un progreso sin precedentes en la ciencia de los derrames de petróleo, gracias a el financiamiento dedicado disponible durante un período de 10 años después del derrame de DWH. Las tecnologías de prevención de derrames de petróleo y control de fuentes han mejorado de manera drástica. Los avances en la prevención de explosiones, el uso del concepto de herramientas de respuesta y el desarrollo de herramientas de evaluación de riesgos son algunos ejemplos de operaciones de respuesta más eficaces, eficientes e integrales.

También se han logrado grandes avances en la ciencia de los procesos y reacciones físicos, químicos y biológicos que influyen en el destino del petróleo en el medioambiente marino. La comprensión de los efectos agudos y crónicos de la contaminación por petróleo en los ecosistemas marinos y estuarinos es otra área de desarrollo significativo, lo que incluye nuevos escenarios de exposición, mecanismos de acción de la toxicidad, modificadores medioambientales de la toxicidad, nuevos hábitats y especies afectadas, implicaciones a largo plazo de los derrames de petróleo y efectos de los vertidos

FUENTE DE LA IMAGEN: Administración Nacional Oceánica y Atmosférica.

de petróleo en la salud humana. Para continuar con este progreso, el comité de autores del informe identificó una serie de temas comunes para el avance de la ciencia sobre los derrames de petróleo.

FINANCIAMIENTO A LARGO PLAZO

La ciencia sobre los derrames de petróleo se ha visto obstaculizada por un ciclo de financiamiento fluctuante y, en consecuencia, la incapacidad de mantener la investigación y el conocimiento científicos. Se necesita un financiamiento más sostenido para apoyar proyectos de investigación multidisciplinarios que aborden las brechas de conocimiento actuales y los requisitos regulativos nuevos y mejoren las capacidades de respuesta.

Un ejemplo del tipo de financiamiento sostenido necesario proviene de la Iniciativa de Investigación del golfo de México, un programa de 10 años iniciado después del derrame de petróleo de DWH. El programa dio como resultado una producción extraordinaria de investigación tanto específica de la disciplina como multidisciplinaria al financiar una combinación de ciencia de campo, laboratorio, mesocosmos e instalaciones de prueba y modelos relacionados.

SALUD HUMANA

Un ecosistema saludable incluye a las personas que trabajan, viven y se recrean a lo largo de sus costas, así como la sostenibilidad de los recursos marinos, como los alimentos, la energía y el transporte. Las agencias gubernamentales involucradas en la respuesta ante derrames de petróleo deben priorizar y prestar mayor atención a los efectos mentales y conductuales individuales y comunitarios, así como a las perturbaciones socioeconómicas de la comunidad, en la toma de decisiones y los procesos de respuesta del ICS.

EXPERIMENTOS EN AGUAS ABIERTAS

La investigación sobre derrames de petróleo, por lo general, se realiza en un laboratorio o tanque de prueba, que no puede simular todas las complejidades y la variabilidad de las condiciones de campo. Se deben planificar, permitir y financiar ensayos de campo controlados en el sitio con petróleo real para incorporar la investigación multidisciplinaria centrada en procesos importantes, así como técnicas de respuesta que no se adaptan con precisión a las condiciones en el sitio a partir de experimentos in vitro o fuera del sitio.

ECOSISTEMAS ÁRTICOS

El tráfico marítimo en aguas árticas está aumentando con la disminución estacional de la capa de hielo, y es posible que aumente la producción de petróleo en alta mar en el Ártico (consulte la figura 2). Experimentos de campo en Noruega, Canadá, Alaska, Svalbard y Groenlandia han revelado procesos complejos que afectan el petróleo en entornos árticos, pero utilizar esta información en el modelado o la respuesta requiere trabajo adicional. Se necesita un esfuerzo concertado para recopilar información sobre el destino del petróleo en los ecosistemas marinos del Ártico.

NUEVOS COMBUSTIBLES

En 2020 entraron en vigor los nuevos requisitos de LSFO para el transporte marítimo, pero los estudios sobre estos petróleos son bastante limitados. El Gobierno debería financiar la investigación sobre la composición, la toxicidad y el comportamiento de los nuevos tipos de combustibles marinos (p. ej., LSFO, VLSFO, biocombustibles) y productos derivados del petróleo (p. ej., bituminosos diluidos) para comprender su destino y sus efectos y planificar y ejecutar las operaciones de respuesta de la manera más eficaz para reducir los impactos.

CONOCIMIENTOS DE REFERENCIA

La falta de datos previos al derrame sobre factores como la oceanografía física, las especies críticas y los procesos biogeoquímicos dificulta la comparación con las observaciones posteriores al derrame y la evaluación de la remediación. Es necesario revisar cómo recopilar, poner a disposición y archivar de la manera más eficaz el conocimiento y los datos pertinentes de diversas fuentes. El comité también sugiere establecer fondos para la recolección de datos en zonas de alto riesgo y un proceso para una recolección rápida en caso de derrame, incluso en áreas vecinas no afectadas que actuarán como control.

INVESTIGACIÓN INTERDISCIPLINARIA

Los avances en las técnicas analíticas, en particular, en la química del petróleo y del medioambiente y en la ómica, han generado enormes flujos de datos. Se debe crear un repositorio gratuito, central, de acceso universal y depurado para gestionar mejor los conjuntos de datos generados mediante análisis químicos avanzados, técnicas ómicas, estudios geocientíficos (entre otros) y, en especial, estudios de campo y de laboratorio relacionados con los derrames de petróleo.

RECOMENDACIÓN

Financiamiento a largo plazo de la entrada, el destino y los efectos del petróleo en el mar

Como se recomienda en *Petróleo en el mar, III edición*, sigue siendo necesaria una financiación sostenida a largo plazo dedicada al petróleo en el mar para apoyar proyectos de investigación multidisciplinarios que aborden las brechas de conocimiento actuales, incluidas las detalladas como necesidades de investigación a lo largo de este informe. La investigación es necesaria para abordar los nuevos requisitos normativos y mejorar las capacidades de respuesta. La aplicación de nuevos datos y tecnologías para avanzar en el conocimiento interdisciplinario del destino y los efectos del petróleo en el mar exigirá un compromiso de financiamiento más prolongado de lo habitual.

RECOMENDACIÓN

Estudios de campo

Como se recomendó en estudios anteriores, deben planificarse, permitirse y financiarse ensayos de campo controlados en el sitio con petróleo real para incorporar la investigación multidisciplinaria centrada en procesos importantes, así como técnicas de respuesta que no se adaptan con precisión a las condiciones en el sitio a partir de experimentos *in vitro* o fuera del sitio. Además, las agencias competentes deben establecer mecanismos de financiamiento y sistémicos que permitan el despliegue rápido de personal científico calificado durante los derrames de petróleo reales (es decir, los derrames de oportunidad) para llevar a cabo investigaciones apropiadas y urgentes *in situ*, al margen del proceso de evaluación de daños a los recursos naturales, con una interferencia mínima o nula con las actividades de respuesta ante derrames.

RECOMENDACIÓN

Empleo de técnicas analíticas avanzadas

Para responder las preguntas sobre el uso apropiado en los análisis forenses de petróleo derramado y otras entradas, así como en la evaluación de daños y las actividades de respuesta, las agencias pertinentes y las comunidades de investigación deben

- incorporar los avances recientes en técnicas de química analítica en protocolos estandarizados. Se recomienda encarecidamente la ampliación continua del uso de estas técnicas en las investigaciones relacionadas con los estudios de entradas, destinos y efectos. Lo anterior debe ir acompañado de un riguroso control y aseguramiento de la calidad del muestreo y los análisis, respaldado por la preparación, calibración y mantenimiento de un conjunto de materiales de referencia estándar existentes y ampliados, por parte del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de EE. UU. y agencias comparables en Canadá y México.
- Ampliar las bibliotecas actuales de características del petróleo con análisis más detallados y petróleos de referencia.
- Utilizar, continuar desarrollando y validando tecnologías ómicas y sus rápidos avances, dirigidas a individuos (desde microbios hasta organismos superiores) a través de muestras medioambientales que abarquen la composición de poblaciones y comunidades para proporcionar información sobre el destino del petróleo y los efectos directos e indirectos a corto y largo plazo de la exposición al petróleo.

RECOMENDACIÓN

Estudios del Ártico

De acuerdo con informes anteriores, se debe realizar un esfuerzo concertado para reunir información sobre el destino del petróleo en los ecosistemas marinos del Ártico, con y sin cubierta de hielo, antes de seguir desarrollando esta región. Esto incluiría estudios de referencia geofísicos y biológicos, eficacia de las opciones de respuesta y mitigación, obtención de datos sobre atenuación natural y estrategias activas de remediación, incluida la cinética de biodegradación a baja temperatura y efectos sobre organismos superiores, poblaciones y ecosistemas en las aguas del Ártico y en las costas.

RECOMENDACIÓN

Conocimientos y datos de referencia

Es necesario revisar la forma más eficaz de reunir, difundir y archivar los conocimientos y los datos pertinentes de numerosas fuentes, dados los avances y las brechas de comprensión que se señalan en este informe.

- La revisión debe evaluar lo que se necesita para los conocimientos y los datos de referencia, reconociendo que tanto las influencias naturales como las antropogénicas (distintas de las entradas de petróleo) generan criterios básicos que son dinámicos en el espacio y el tiempo.
- Se debe establecer el financiamiento para la obtención y la conservación de datos de referencia adecuados en lugares de especial interés, tales como las zonas costeras, las zonas de prospección y producción de energía en alta mar y las rutas de transporte marítimo.
- La recopilación de datos incluiría aspectos tales como la oceanografía física, los procesos biogeoquímicos, los estudios sobre fuentes de contaminantes, las especies críticas (p. ej., en peligro de extinción, abundantes, vulnerables o de importancia comercial) y la biodiversidad marina, así como métricas pertinentes de la salud y el bienestar de los seres humanos.
- Como corolario, se deberían desarrollar directrices para la recopilación y el análisis de datos de referencia durante un derrame e inmediatamente después, provenientes de zonas vecinas no afectadas (de control), siempre que sea posible.

RECOMENDACIÓN

Gestión de datos e investigación interdisciplinaria

Dados los grandes conjuntos de datos que se generan mediante análisis químicos avanzados, técnicas ómicas, estudios geocientíficos (entre otros) y, en especial, estudios de campo y laboratorio relacionados con derrames de petróleo, el comité recomienda la creación de un repositorio central gratuito, de acceso universal y cuidadosamente seleccionado de información pertinente al petróleo en el mar. El uso óptimo de estos archivos requerirá el desarrollo de análisis de datos, control de calidad de los datos y normas de presentación de informes para los metadatos asociados, a fin de facilitar la integración, la interpretación y la capacitación de equipos interdisciplinarios.



Recomendaciones adicionales de investigación

El informe incluye listas detalladas de investigaciones específicas necesarias para avanzar en la comprensión del petróleo en el mar. Aquí se resumen las recomendaciones clave para llenar estas brechas en la investigación.

Investigación recomendada para avanzar en la respuesta ante derrames de petróleo y minimizar los efectos

- 4.1 Nuevos tipos de combustible y productos de producción petrolífera:** se debe evaluar cuidadosamente la eficacia de las diversas técnicas de respuesta y sus oportunidades para responder a los combustibles híbridos, en particular a los combustibles con bajo contenido de azufre y a los productos de yacimientos petrolíferos bituminosos diluidos (dilbit).
- 4.2 Análisis del ciclo de vida de derrames de petróleo basado en escenarios de respuesta:** se requiere una colaboración continua entre científicos académicos, gubernamentales e industriales y profesionales de respuesta para desarrollar un análisis integral, multifacético y realista del destino

y los efectos de las manchas de petróleo desde su inicio hasta su fin en diversos escenarios de respuesta, lo que incluye la atenuación natural controlada. Este análisis debe abarcar todas las posibles variaciones de los escenarios de respuesta ante un mismo evento, a fin de brindar a quienes toman las decisiones una visión completa y exhaustiva de los resultados de las decisiones en cada uno de los escenarios. Actualmente, resulta difícil crear una visión completa y exhaustiva a partir de los resultados de múltiples estudios descoordinados con un enfoque limitado, ya que estos estudios se realizan con diferentes metas y condiciones en mente y no se prestan a una integración fluida

4.3 Riesgos para la salud y la seguridad de los profesionales de respuesta:

se debe realizar una investigación sobre los riesgos para la salud y los impactos psicológicos en el personal que participa en diversos tipos de operaciones de respuesta. Esta información debe integrarse en la toma de decisiones de respuesta.

4.4 Herramientas de respuesta y recuperación mecánica:

las tecnologías de recuperación mecánica se beneficiarían de las investigaciones dirigidas a mejorar las tasas de encuentro, en específico, el volumen de petróleo que entra a los dispositivos de contención y está disponible para la recuperación, así como la optimización de la eficiencia de una tecnología particular en diversas condiciones medioambientales y escenarios de derrames (p. ej., la recuperación de petróleo sumergido). La recuperación mecánica también debe considerarse un sistema multicomponente que incluye movilización de equipos y recolección, recuperación, almacenamiento, transferencia y eliminación de petróleo. El análisis de posibles retrasos en este sistema en diferentes escenarios de respuesta ayudará a identificar posibles áreas de mejora.

4.5 Herramientas de respuesta y quema en el sitio:

la investigación centrada en mejorar la eficiencia y ampliar las oportunidades para la quema en el sitio debe continuar e incluir diversos escenarios, como la quema en barreras convencionales, el uso de pastores, la quema en tierra firme y la quema en condiciones árticas.

- 4.6 Herramientas de respuesta y dispersantes químicos:** se recomiendan esfuerzos continuos de investigación enfocados en aumentar los procesos de dispersión natural mediante el uso de dispersantes químicos, que incluyen nuevas formulaciones y materiales naturales, así como en técnicas de dispersión mecánica para escenarios seleccionados de explosiones en alta mar.
- 4.7 Herramientas de respuesta en condiciones árticas:** si bien se ha logrado un progreso significativo en nuestra comprensión de la aplicabilidad y eficiencia de diversas técnicas de respuesta en condiciones árticas, estos esfuerzos deben continuar, dada la gran diversidad de posibles escenarios de respuesta, así como las nuevas formulaciones de combustibles que pueden encontrarse en esa región.
- 4.8 Gestión de la fauna silvestre contaminada con petróleo:** sería beneficioso realizar más investigaciones sobre los impactos a largo plazo, las tasas de supervivencia y el retorno a la función normal de los animales tratados y liberados para perfeccionar los métodos de gestión de la fauna silvestre contaminada con petróleo.

Necesidades de investigación para comprender mejor el destino del petróleo en el medioambiente marino

- 5.1 Mecanismos físicos que afectan el destino del petróleo:** gracias a las nuevas instalaciones y métodos de laboratorio, se han logrado avances significativos en la medición de la distribución del tamaño de las gotas para la ruptura de chorros de petróleo y la dispersión de petróleo flotante. Estos datos pueden utilizarse para desarrollar y probar modelos de distribución del tamaño de las gotas de petróleo; sin embargo, dado que los experimentos de laboratorio a escala reducida no se ajustan al espacio de parámetros a escala de campo, los datos a escala de campo para la rotura y dispersión de petróleo y gas siguen siendo una necesidad importante. Los experimentos que utilizan SSDI son, en particular, importantes para evaluar la mezcla de dispersantes a escala de campo, ya que el petróleo tratado a escala de campo se encuentra más fuera del rango de parámetros de las mediciones existentes que los vertidos sin tratar.

5.2 Reacciones químicas que afectan el destino del petróleo: con la renovada apreciación de la fotooxidación como un proceso significativo que afecta la química del petróleo, se necesita más investigación para centrarse en las interacciones de los productos fotoquímicos con las propiedades físicas y químicas del petróleo, su comportamiento en la columna de agua y en las costas (p. ej., emulsificación y adherencia a superficies minerales) y su efecto en la biodegradación. Se deben examinar el destino y los efectos de los hidrocarburos oxigenados, en especial, en las regiones costeras, así como el efecto de la adición de dispersantes superficiales o subterráneos sobre la fotooxidación y procesos posteriores, como la formación de nieve marina de petróleo.

5.3 Efectos biológicos en el destino del petróleo: la biodegradación aeróbica de los componentes del petróleo se ha estudiado de manera exhaustiva durante décadas, pero el alcance y la cinética de la biodegradación anaeróbica de hidrocarburos, pertinentes para los sedimentos del fondo marino y estuarinos, así como para los sedimentos costeros de grano fino, son menos conocidos. Además, se desconoce cómo se manifiesta en el sitio el fenómeno de la “fase de latencia”, que con frecuencia se observa en estudios de laboratorio sobre biodegradación anaeróbica; esto afectaría la escala temporal de la atenuación natural en sitios anaeróbicos. Por lo tanto, se necesita más investigación para comprender mejor la cinética y el alcance de la biodegradación anaeróbica del petróleo en el mar como componente de la evaluación de la atenuación natural.

Un factor físico poco estudiado es la alta presión hidrostática, en especial, cuando se combina con baja temperatura y nutrientes limitados, como en los sedimentos de las profundidades marinas, donde es probable que afecte la persistencia del petróleo sedimentado y enterrado. Debido a que tales condiciones son difíciles de lograr en el laboratorio, se necesitan avances tecnológicos para realizar experimentos en el sitio o recolectar muestras de las profundidades marinas y posteriormente manipularlas en el laboratorio sin despresurizarlas.

El efecto de la adición de dispersantes químicos en la biodegradación del petróleo ha sido controvertido en la literatura, debido, al menos en parte, a las diversas condiciones de laboratorio que no imitan las circunstancias de respuesta a derrames en el sitio. Esta controversia debería abordarse mediante la adopción de las mejores prácticas para

el diseño de experimentos pertinentes para las condiciones de derrame bajo las cuales se podría utilizar dispersante, como la idoneidad del tipo de petróleo evaluado para la dispersión, el estado meteorizado del petróleo, la concentración de petróleo, la relación dispersante-petróleo y la energía de mezcla aplicada.

La MOSSFA fue reconocida como un mecanismo de transporte significativo para el petróleo derramado durante el evento de DWH (y posiblemente, en retrospectiva, durante el derrame de Ixtoc I). Sin embargo, aún no se han documentado casos paralelos de sedimentación y floculación extrema de nieve marina fuera del golfo de México. Las posibles razones para la observación, actualmente novedosa, de DWH incluyen las siguientes:

(1) DWH fue un derrame de gran volumen en alta mar en aguas con menores concentraciones de partículas minerales en suspensión que los derrames previos, más comunes cerca de la costa, de menor volumen y con mayor cantidad de partículas en suspensión; (2) la respuesta de DWH involucró una magnitud sin precedentes de SSDI; y (3) en las décadas recientes, avances significativos en técnicas e instrumentos de muestreo y control de campo (p. ej., trampas de sedimentos o trampas interceptoras de partículas, muestreo de núcleos de sedimentos superficiales no perturbados e imágenes submarinas) han proporcionado medios para observar la ocurrencia de nieve marina de petróleo (marine oil snow, MOS). Será importante aprovechar el potencial de estas técnicas e instrumentos para futuros derrames de petróleo en áreas donde la nieve marina es un fenómeno natural que podría provocar eventos de MOSSFA. La presencia de nieve marina natural (sin petróleo) en ecosistemas marinos sugiere que la MOS y la MOSSFA podrían ser importantes en otros lugares, aunque es necesario determinar la función combinada de la liberación de petróleo en las profundidades marinas y la implementación de SSDI en el fomento de otros eventos de MOSSFA. Dado que la formación de MOS implica procesos físicos, químicos y biológicos (p. ej., evaporación, adsorción y reacciones enzimáticas), dicho estudio debe ser interdisciplinario. La observación de los “derrames de oportunidad” debe incluir mediciones de la abundancia de MOS y considerar la contribución de MOSSFA a la sedimentación del petróleo. Si son globalmente significativos, los modelos de balance de petróleo deben incorporar términos de MOSSFA.

El proceso de atenuación natural implica que no se requiere ninguna intervención para que la microbiota nativa biodegrade el petróleo en el sitio. Sin embargo, es necesario continuar la investigación para evaluar la eficiencia y el alcance de la atenuación natural de diversas mezclas de hidrocarburos y productos de respuesta en diversos entornos (p. ej., en aguas árticas frente a aguas templadas, a diferentes profundidades de la columna de agua, en diversos tipos de costas y sedimentos bentónicos). Dichas investigaciones proporcionarán una mejor comprensión de la aplicabilidad de la atenuación natural en diferentes escenarios y generarán datos adicionales para evaluar el destino del petróleo y su potencial de biodegradación.

El poder de las técnicas ómicas aún no se ha implementado por completo en la investigación de derrames de petróleo, pero podría contribuir a los estudios de referencia, la predicción del potencial de atenuación natural y el control de las trayectorias de biorremediación. Se necesita una investigación considerable para traducir los datos ómicos en información significativa como herramienta de biorremediación para modelar el destino del petróleo y controlar el progreso de la atenuación natural.

5.4 Destino del petróleo en sitios remotos: Algunos ecosistemas han sido poco estudiados debido a su inaccesibilidad, como el Ártico y las profundidades marinas, debido a las dificultades técnicas de la investigación en el Ártico. Aquí existe una necesidad crítica de investigación para recopilar nuevos datos que validen los algoritmos de transporte de petróleo en el hielo, correlacionar las predicciones de los modelos de evolución del hielo con los mecanismos que controlan el destino y el transporte del petróleo, desarrollar nuevos modelos de interacción del petróleo con el hielo más orientados a los procesos y proponer sistemas de observación que puedan utilizarse durante la respuesta a derrames de petróleo para recopilar los datos necesarios para realizar predicciones precisas del destino y la trayectoria del petróleo. Las interacciones del petróleo con el hielo son complejas y determinar cómo se dispersa el petróleo bajo una cobertura de hielo parcial o total sigue siendo un desafío importante para predecir las trayectorias del petróleo durante la respuesta. La nueva instalación de mesocosmos océano-hielo marino en la bahía de Hudson brindará oportunidades para estudiar estos procesos. Además, la aplicación de técnicas ómicas a las regiones marinas polares se ha quedado rezagada con respecto a los estudios de entornos marinos templados y se necesitan más investigaciones para comprender mejor las respuestas del ecosistema ártico al petróleo. Una mejor comprensión de la relación entre la cinética

de biodegradación del petróleo y la temperatura beneficiaría tanto a los estudios en el Ártico como en las profundidades marinas.

5.5 Comportamiento y destino de los petróleos nuevos o no

convencionales: se prevé que dos clases de petróleos no convencionales se transporten por buque en volúmenes cada vez mayores durante la próxima década: productos bituminosos diluidos, LSFO y VLSFO. Si bien se han realizado algunas investigaciones sobre el potencial de inmersión y hundimiento del dilbit en diversos entornos, aún no se ha producido un derrame marino importante de esta mezcla de dos componentes, y el destino del diluyente frente al dilbit meteorizado justifica una mayor experimentación a cielo abierto a gran escala para comprender mejor su posible comportamiento y destino. Se sabe que las nuevas clases de combustible marino obligatorio presentan una composición muy variable, pero actualmente se sabe muy poco sobre la evaporación, la gelificación, la dispersión, la adherencia a la costa, etc. Dado que los combustibles se utilizarán a nivel mundial, es esencial realizar experimentos de laboratorio en el sitio en diferentes condiciones medioambientales para aumentar el conocimiento y la concienciación sobre su posible destino.

Una tercera clase posible son los biocombustibles, que no se han analizado de manera amplia en este informe, pero que podrían convertirse en un combustible importante para el transporte. Dentro de esta amplia categoría de combustibles, el destino de los componentes individuales podría inferirse a partir de otros conocimientos, pero actualmente se sabe poco sobre su destino compuesto en el mar.

5.6 Refinamiento de los modelos de comportamiento y destino del

petróleo: a medida que mejora nuestra comprensión del destino y el transporte del petróleo en el mar, también surge la necesidad de convertir nuestros nuevos conocimientos en algoritmos operativos para el modelado del destino y la trayectoria del petróleo, lo que incluye la necesidad de desarrollar nuevos algoritmos de modelado, incorporarlos a los modelos y validar sus predicciones, idealmente utilizando observaciones en el sitio. Algunos de los nuevos conocimientos que se están desarrollando actualmente o que aún deben parametrizarse para los modelos de derrames de petróleo incluyen la fotooxidación, las MOSSFA, los efectos de la temperatura en la cinética de la biodegradación y la biodegradación anaeróbica, entre otros. También existe una necesidad actual de integrar los modelos de derrames de petróleo con el gran flujo de datos de observación que pueden formar parte de una respuesta a un derrame.

Investigación recomendada para avanzar en la comprensión de los efectos del petróleo en el mar sobre el medioambiente marino

- 6.1 Filtraciones naturales:** al ser hábitats relativamente poco estudiados, se necesita investigación para aumentar nuestra comprensión de las comunidades quimiosintéticas únicas cerca de las filtraciones naturales, en especial, en las zonas marinas más profundas, para identificar nuevas especies o vías bioquímicas y la quimiosíntesis, para identificar bacterias que puedan ser útiles en la respuesta a derrames de petróleo (es decir, degradadores de petróleo) y para comprender cómo los organismos y las comunidades responden a la presencia de petróleo.
- 6.2 Nieve marina de petróleo:** es necesario continuar la investigación sobre la formación de MOS con respecto a sus influencias en los procesos de degradación del petróleo y el destino final de los hidrocarburos, como el flujo a través de la columna de agua, las interacciones con los organismos de la columna de agua y las comunidades biogénicas de las profundidades marinas a corto y largo plazo.
- 6.3 Técnicas de evaluación:** las posibles áreas de investigación serían el desarrollo de sensores para hidrocarburos de petróleo y el análisis de imágenes de plancton en el sitio, así como vehículos submarinos autónomos para la determinación de los efectos en la columna de agua.
- 6.4 Salud del ecosistema de las marismas:** los protocolos de evaluación de daños a los recursos naturales de las marismas después de la exposición a un derrame de petróleo deberían incorporar medidas adicionales de la salud de las marismas, incluida su integridad estructural. La investigación sobre otras medidas o el desarrollo de avances tecnológicos (p. ej., sistemas portátiles de fotosíntesis para el intercambio de gases y mediciones de la fluorescencia de la clorofila en plantas) también pueden generar indicadores representativos más universales.

El estudio a largo plazo con múltiples características integradas del ecosistema de marismas indica la necesidad de que este tipo de estudios integre los múltiples aspectos de la contaminación, la ecología de las

marismas, la estructura trófica, la dinámica depredador-presa, la comprensión de los microhábitats dentro de la marisma y un enfoque integrado que abarca desde la genética y las respuestas enzimáticas hasta los efectos en los ecosistemas.

6.5 Vertebrados marinos: se necesitan estudios centrados en una mejor estimación de la mortalidad de aves marinas, mamíferos marinos y tortugas marinas durante futuros derrames de oportunidad. Estos estudios deben incluir métodos de muestreo que permitan la estimación de intervalos de confianza estadística, además de estimaciones puntuales de, por ejemplo, el número de animales muertos.

6.6 Corales: se deben estudiar los numerosos factores de estrés ambiental y de salud de los corales, junto con investigaciones adicionales sobre la sensibilidad de las especies y las etapas de vida, para comprender mejor el impacto del petróleo en estos importantes ecosistemas de arrecifes de coral.

Los estudios de corales mesofóticos y de las profundidades marinas destacan la necesidad de estudios de referencia previos sobre la salud de los ecosistemas bentónicos, junto con estudios de seguimiento a largo plazo sobre la recuperación, el retraso en la mortalidad y el continuo deterioro de la salud de estas especies, en especial, dado su lento crecimiento y menor selección, en comparación con otras especies marinas y, por lo tanto, su potencial para un período de recuperación prolongado.

6.7 Efectos en los ecosistemas: una mejor comprensión de la estructura trófica en los sistemas marinos podría lograrse mediante un diseño experimental que incorpore poblaciones, interacciones tróficas comunitarias, múltiples factores de estrés e interrelaciones que permitan anticipar los efectos indirectos o en cascada de un derrame de petróleo. Los estudios de campo que incorporan todas estas características podrían no reproducir la complejidad de un ecosistema marino, pero los modelos podrían proporcionar una base para una mayor exploración.

La incorporación de observaciones y experimentos a más largo plazo que incluyan componentes de mayor nivel organizacional e interacciones tróficas debería ser financiada por las agencias y las partes responsables correspondientes. Para estos fines, las agencias competentes deben fomentar y apoyar las iniciativas para desarrollar atlas ecológicos de recursos marinos que identifiquen áreas ecológicas y hábitats de especial

importancia para especies amenazadas o en peligro de extinción, similares a los desarrollados por Audubon, Oceana y otras organizaciones ambientales no gubernamentales para el Ártico de Alaska. Estos atlas podrían servir para extender a las aguas costeras el enfoque del Índice de Sensibilidad Ambiental que se utiliza en la actualidad para las costas.

6.8 Caracterización de la contaminación por petróleo en la costa: una comparación de las categorías de contaminación por petróleo de la técnica de limpieza y evaluación de costas (Shoreline Cleanup and Assessment Technique, SCAT) con la caracterización química de los hidrocarburos beneficiaría los estudios de campo posteriores y la comparación de los resultados de los efectos, basados principalmente en las categorías de la SCAT de cuatro niveles. Además, el uso de métodos de muestreo estadísticos para estimar los límites superior e inferior de la extensión e intensidad de la contaminación por petróleo en la costa, lo que incluye estimaciones de petróleo subterráneo, permitiría realizar comparaciones significativa entre períodos de muestreo para estimar las tendencias temporales de la persistencia del petróleo.

6.9 Fotooxidación: se debe evaluar la toxicidad de los productos fotooxidados de los compuestos que se disuelven del petróleo en el agua de mar para determinar su contribución a los efectos de toxicidad aguda y crónica en los organismos de prueba. Se necesitan más estudios para caracterizar la gama de productos de fotooxidación producidos por diversos petróleos y evaluar su persistencia, bioacumulación y toxicidad para organismos de prueba de toxicidad estándar. Se deberían incluir en estos estudios organismos adicionales y numerosos estadios de vida.

Se necesita más investigación sobre la radiación ultravioleta (UV), las temperaturas elevadas y la disminución del pH para evaluar de forma completa los efectos de estos factores conjuntos y las condiciones climáticas cambiantes en la toxicidad y el impacto de la contaminación por petróleo en los ecosistemas expuestos.

6.10 Efectos del petróleo en el comportamiento: al ser un efecto relativamente poco estudiado, se necesita investigación para evaluar con mayor profundidad los efectos de la exposición al petróleo en las respuestas conductuales de los organismos.

6.11 Estudios y modelos de toxicidad:

1. rediseñar las pruebas de toxicidad necesarias para proporcionar datos útiles para la verificación de modelos y en el proceso de toma de decisiones (es decir, las compensaciones de la respuesta). Facilitar una mayor integración entre los estudios de laboratorio y los modelos útiles para el equipo de respuesta a derrames de petróleo. Los estudios de toxicidad deben centrarse en los impactos crónicos y subletales, en particular, en los nuevos mecanismos de acción que tienen consecuencias para la salud y la población (p. ej., la respuesta inmunitaria). La influencia de las variables medioambientales conjuntas (p. ej., las reacciones luminosas o fotoquímicas y la presión) debe evaluarse con mayor profundidad e incluirse en los modelos.
2. Revisar y actualizar los procedimientos estándar para la preparación y caracterización de los medios de prueba de toxicidad, así como la realización de pruebas de toxicidad, que incluyen el control de variables conjuntas adicionales y su manera de informarlas (p. ej., la actualización de los protocolos de CROSERF). Se deben exigir descripciones de los tipos de caracterización química (p. ej., en relación con la resolución y partición de los componentes químicos, es decir, concentraciones disueltas y de gotas y caracterización del tamaño y volumen de las gotas). Se debe identificar y exigir el informe mínimo de datos.
3. Los diseños de las pruebas de estudio deben identificar claramente las preguntas formuladas, la pertinencia ecológica y las especies o etapas de vida utilizadas, y emplear análisis químicos apropiados (p. ej., filtración de medios de exposición y analitos específicos medidos), además de informar los criterios de valoración toxicológicos apropiados para el estudio, que incluyen el uso de unidades tóxicas si corresponde.
4. Los estudios deben orientarse a la investigación de nuevas vías de exposición (p. ej., inhalación en mamíferos marinos, aves marinas y tortugas; la influencia de las vías de transferencia materna) y nuevos mecanismos de toxicidad (p. ej., función suprarrenal, respuesta inmunitaria e influencia e importancia del microbioma).
5. Los estudios sobre los efectos del petróleo superficial ingerido por peces en los efectos cardiotoxicos de los compuestos aromáticos policíclicos del petróleo superficial y en embriones de peces deben respaldarse en estudios de laboratorio y durante futuros derrames de oportunidad.

6. Los modelos (p. ej., OilTox, Petrotox) deben seguir perfeccionándose en función de los datos de entrada (p. ej., función de las gotas, componentes químicos adicionales) y la influencia de las variables ambientales (p. ej., fotooxidación, luz ultravioleta, temperatura, presión). Los modelos también deben seguir validándose, en particular, mediante iniciativas interlaboratorios nacionales o mundiales o ensayos de campo si corresponde.

6.12 Seguridad de los mariscos:

1. actualizar la lista de analitos incluidos en la evaluación de riesgos para las consideraciones de seguridad de los mariscos y perfeccionar los enfoques actuales (p. ej., equivalentes de benzopireno).
2. Las agencias gubernamentales involucradas en la respuesta a un derrame de petróleo deben realizar un esfuerzo conjunto para la reevaluación exhaustiva del riesgo para la salud que conlleva el cierre y la reapertura de las zonas de recolección de mariscos después de un derrame, lo que incluye un análisis exhaustivo de los diferentes tipos de HAP que es probable que estén presentes y su contribución relativa al riesgo para la salud. Las agencias gubernamentales deben patrocinar un programa integrado continuo que respalde una amplia gama de investigaciones relacionadas con el riesgo, pertinentes para las decisiones sobre el cierre y la reapertura de las zonas de recolección de mariscos después de la contaminación por petróleo.
3. Establecer las concentraciones actuales de contaminantes de HAP en tejidos comestibles de mamíferos marinos consumidos por comunidades indígenas del Ártico.

6.13 Respuesta de la comunidad costera: los programas para mejorar la resiliencia comunitaria en respuesta a futuros derrames de petróleo deben adaptarse a las comunidades en riesgo. Se necesita apoyo para iniciativas de investigación en ciencias sociales que incorporen la comprensión de la amplia gama de factores locales como base para la preparación ante el próximo derrame de petróleo u otros desastres. La EPA y otras agencias deben incorporar los hallazgos existentes y nuevos en la planificación ante desastres (p. ej., *Handbook on Area Contingency Planning [Manual de planificación de contingencias para áreas]* de la EPA, que actualmente no considera la salud comunitaria).

6.14 Seguimiento de estudios epidemiológicos: en los estudios realizados con personal de respuesta se ha observado una asociación a largo plazo entre los efectos cardiovasculares y del sistema nervioso central a niveles de exposición a hidrocarburos de petróleo que son órdenes de magnitud inferiores a las exposiciones que actualmente se permiten para los trabajadores. Parece poco probable que esta asociación sea causal en ausencia de tales hallazgos en fuerzas laborales bien estudiadas expuestas a niveles más altos durante períodos más largos, pero no debería descartarse sin un seguimiento riguroso adicional.

6.15 Salud maternoinfantil: la relativa ausencia de trabajadoras en la industria petrolera en el pasado ha limitado la disponibilidad de información sobre los posibles impactos en la salud maternoinfantil. Se debe realizar un seguimiento a largo plazo de cohortes de mujeres embarazadas durante el derrame de petróleo de DWH y de niños de la comunidad. También sería útil aumentar la limitada información toxicológica sobre los posibles efectos reproductivos y de desarrollo de los derivados del petróleo crudo que es posible que lleguen a las comunidades costeras.

COMITÉ SOBRE PETRÓLEO EN EL MAR, IV EDICIÓN ENTRADAS, DESTINOS Y EFECTOS:

Kirsi K. Tikka (Academia Nacional de Ingeniería [National Academy of Engineering, NAE]) (*presidenta*), compañías marítimas, American Bureau of Shipping (*jubilada*); Edwin “Ed” Levine, Scientific Support and Coordination, LLC; Akua Asa-Awuku, Universidad de Maryland; Cynthia Beegle-Krause, Fundación para la Investigación Industrial y Técnica (Stiftelsen for industriell og teknisk forskning, SINTEF); Victoria Broje, Shell Projects and Technology; Steven Buschang, Oficina General de Tierras de Texas; Dagmar Schmidt Etkin, Consultoría de Investigación Medioambiental; John Farrington, Institución Oceanográfica Woods Hole; Julia Fought, Universidad de Alberta; Bernard Goldstein (Academia Nacional de Medicina [National Academy of Medicine, NAM]), Universidad de Pittsburgh; Carys Mitchelmore, Centro de Ciencias Ambientales de la Universidad de Maryland; Nancy Rabalais, Universidad Estatal de Luisiana; Scott Socolofsky, Universidad Texas A&M; Berrin Tansel, Universidad Internacional de Florida; Helen K. White, Haverford College; y Michael Ziccardi, Universidad de California, Davis.

PERSONAL DEL ESTUDIO: Kelly Oskvig, directora del estudio; Megan May, ejecutiva adjunta de programas; Kenza Sidi-Ali-Cherif, asistente de programas; Grace Callahan, asistente de programas; Nancy Huddleston, directora de comunicaciones y medios; Solmaz Spence, especialista en comunicaciones; Paige Nankey, asociada de comunicaciones.

El estudio fue patrocinado por el Instituto Estadounidense del Petróleo, la Oficina de Administración de la Energía Oceánica, la Oficina de Seguridad y Control Medioambiental, el Departamento de Pesca y Océanos de Canadá, la Iniciativa de Investigación del Golfo de México y el Fondo del Círculo de Presidentes de las Academias Nacionales de Ciencias, Ingeniería y Medicina. Las opiniones, los hallazgos, las conclusiones o las recomendaciones que se expresan en esta publicación no reflejan necesariamente los puntos de vista de ninguna organización o agencia que haya otorgado su apoyo al proyecto.

Este folleto fue preparado por las Academias Nacionales con base en el informe del comité. Para obtener más información o copias, visite la Junta de Estudios Oceánicos en <http://nationalacademies.org/osb>.

El folleto y *Petróleo en el mar, IV edición: entradas, destinos y efectos* están disponibles en Prensa de las Academias Nacionales en <http://nap.nationalacademies.org>.

ACERCA DE LAS ACADEMIAS NACIONALES

La **Academia Nacional de Ciencias** se estableció en 1863 mediante una ley del Congreso, firmada por el presidente Lincoln, como una institución privada no gubernamental para asesorar a la nación acerca de temas relacionados con la ciencia y la tecnología. Sus miembros son elegidos por sus pares por sus destacadas contribuciones a la investigación. Su presidenta es la Dra. Marcia McNutt.

La **Academia Nacional de Ingeniería** se estableció en 1964 en virtud del estatuto de la Academia Nacional de Ciencias para llevar las prácticas de la ingeniería para asesorar a la nación. Sus miembros son elegidos por sus pares por sus extraordinarias contribuciones a la ingeniería. Su presidente es el Dr. John L. Anderson.

La **Academia Nacional de Medicina** (anteriormente, el Instituto de Medicina) se estableció en 1970 en virtud del estatuto de la Academia Nacional de Ciencias para asesorar a la nación acerca de cuestiones médicas y de salud. Sus miembros son elegidos por sus colegas por sus destacadas contribuciones a la medicina y la salud. Su presidente es el Dr. Victor J. Dzau.

Las tres Academias trabajan juntas como las **Academias Nacionales de Ciencias, Ingeniería y Medicina** para brindar análisis y asesoramiento independientes y objetivos al país, así como para realizar otras actividades que permitan resolver problemas complejos e informar las decisiones de política pública. Las Academias Nacionales también fomentan la educación y la investigación, reconocen las contribuciones destacadas al conocimiento y aumentan la comprensión del público de asuntos relacionados con la ciencia, la ingeniería y la medicina.

Obtenga más información sobre las Academias Nacionales de Ciencias, Ingeniería y Medicina en **www.nationalacademies.org**.

NATIONAL
ACADEMIES

*Sciences
Engineering
Medicine*

The National Academies provide
independent, trustworthy advice
that advances solutions to society's
most complex challenges.

www.nationalacademies.org