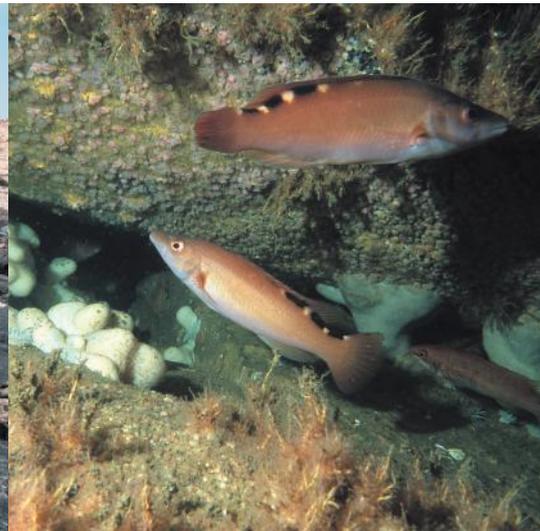
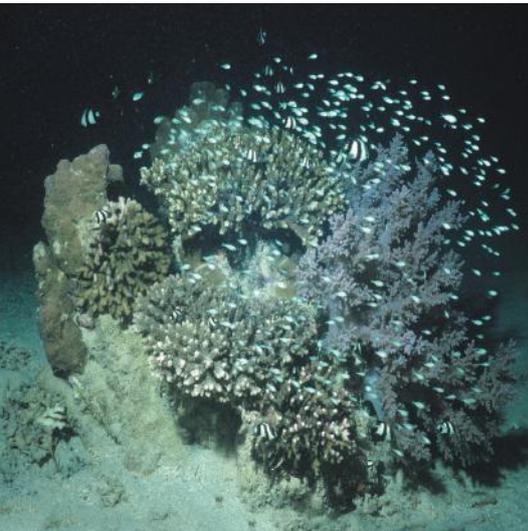


Impactos de los derrames de hidrocarburos sobre la ecología marina

Directrices de buenas prácticas para el personal de manejo de impactos y respuesta a emergencias



IPIECA

La asociación de la industria global del petróleo y del gas para cuestiones medioambientales y sociales

Level 14, City Tower, 40 Basinghall Street, London EC2V 5DE, Reino Unido
Teléfono: +44 (0)20 7633 2388 Fax: +44 (0)20 7633 2389
Correo electrónico: info@ipieca.org Sitio web: www.ipieca.org



Asociación Internacional de Productores de Petróleo y Gas

Oficina de Londres

Level 14, City Tower, 40 Basinghall Street, London EC2V 5DE, Reino Unido
Teléfono: +44 (0)20 7633 0272 Fax: +44 (0)20 7633 2350
Correo electrónico: reception@iogp.org Sitio web: www.iogp.org

Oficina de Bruselas

Boulevard du Souverain 165, 4th Floor, B-1160 Bruselas, Bélgica
Teléfono: +32 (0)2 566 9150 Fax: +32 (0)2 566 9159
Correo electrónico: reception@iogp.org Sitio web: www.iogp.org

Informe de IOGP N.º 525

Fecha de publicación: 2015

© IPIECA-IOGP 2015 Todos los derechos reservados.

Ninguna parte de esta publicación puede reproducirse, almacenarse en un sistema de recuperación ni transmitirse de ninguna forma ni por ningún medio, ya sea electrónico, mecánico, de fotocopiado, grabación u otro modo, sin el consentimiento previo de IPIECA.

Descargo de responsabilidad

Si bien se han realizado todos los esfuerzos posibles para garantizar la exactitud de la información contenida en esta publicación, ni IPIECA, IOGP ni ninguno de sus miembros pasados, presentes o futuros garantizan su exactitud; y tampoco, independientemente de la posible negligencia de los mencionados, asumirán ninguna responsabilidad por cualquier uso previsto o imprevisto que se haga de esta publicación. Por consiguiente, dicho uso se hará bajo el riesgo propio del receptor, teniendo en cuenta que cualquier uso por parte del receptor constituye un acuerdo con los términos de este descargo de responsabilidad. La información contenida en esta publicación no pretende ser una asesoría profesional de los diversos contribuidores de contenidos y ni IPIECA, IOGP ni sus miembros aceptan ningún tipo de responsabilidad por las consecuencias del uso o mal uso de tal documentación. Este documento puede proporcionar orientación que sea complementaria a los requisitos de la legislación local. Sin embargo, nada de su contenido pretende sustituir, enmendar, anular o de algún otro modo alejarse de dichos requisitos. En el caso de que exista un conflicto o contradicción entre las estipulaciones de este documento y la legislación local, prevalecerán las leyes aplicables.

Impactos de los derrames de hidrocarburos sobre la ecología marina

Directrices de buenas prácticas para el personal
de manejo de impactos y respuesta a emergencias

Prólogo

Esta publicación es parte de la serie Guía de Buenas Prácticas de IPIECA-IOGP, que resume los puntos de vista actuales sobre las buenas prácticas con relación a una variedad de temas sobre preparación y respuesta ante derrames de hidrocarburos. La serie pretende contribuir a alinear las prácticas y actividades de la industria, informar a los grupos de interés y servir como herramienta de comunicación para fomentar la conciencia y la educación.

La serie actualiza y sustituye la consolidada "Serie de informes sobre derrames de hidrocarburos" de IPIECA, que se publicó entre 1990 y 2008. Aborda temas que son ampliamente aplicables tanto a la exploración como a la producción, así como a las actividades de navegación y transporte.

Las revisiones se están llevando a cabo por el Proyecto conjunto del sector (JIP, por sus siglas en inglés) sobre respuesta ante derrames de hidrocarburos de IOGP-IPIECA. El JIP se estableció en 2011 para implementar oportunidades de aprendizaje con respecto a la preparación y respuesta ante derrames de hidrocarburos, después del incidente en abril de 2010 con el control del pozo petrolífero en el Golfo de México.

La serie original de informes de IPIECA será retirada progresivamente a medida que se vayan publicando los diversos títulos de esta nueva serie de Guía de Buenas Prácticas durante 2014–2015.

Nota sobre las buenas prácticas

"Buenas prácticas" en el contexto del JIP es una declaración de directrices, prácticas y procedimientos reconocidos internacionalmente que capacitarán al sector del petróleo y del gas para tener un nivel de desempeño aceptable en lo que concierne a la salud, la seguridad y el medio ambiente.

El concepto de buena práctica para un tema en particular cambiará con el tiempo a la luz de los avances tecnológicos, la experiencia práctica y la comprensión científica, así como los cambios en el entorno político y social.

Contenido

Prólogo	2	Impactos de los derrames de hidrocarburos sobre la vida marina y la fauna relacionada	20
Introducción	4	Plancton	20
Los ecosistemas marinos y los hidrocarburos	4	Vida en los lechos marinos	21
Propósito de este documento	6	Peces y fauna piscícola	26
Petróleo en el entorno marino	7	Mamíferos marinos	30
Composición y características de los hidrocarburos	7	Reptiles marinos	33
El destino de los hidrocarburos	9	Aves	34
<i>Evaporación</i>	10	Hábitats en las costas y las orillas	37
<i>Extensión y movimiento</i>	10	Manejo del impacto potencial y de la respuesta ante derrames de hidrocarburos	39
<i>Disolución</i>	11	Análisis de Beneficio Ambiental Neto	40
<i>Dispersión</i>	11	Los beneficios e impactos de la aplicación de dispersantes	41
<i>Emulsificación</i>	11	Evaluación de daños de derrames de hidrocarburos, actividades clave	44
<i>Sedimentación</i>	12	Referencias y lecturas adicionales	46
<i>Hundimiento</i>	12	Manuales y documentos guía	46
<i>Encallamiento en la costa</i>	13	Literatura sobre el destino y los efectos	47
<i>Fotooxidación</i>	14	Sitios web de utilidad	51
<i>Biodegradación</i>	14	Agradecimientos	52
Impactos ecológicos y recuperación	15		
Exposición a los hidrocarburos y mecanismos de efecto	15		
Factores que influyen sobre los impactos de los hidrocarburos	17		
<i>Estacionalidad</i>	17		
<i>Función ecológica de las especies clave</i>	17		
<i>Factores del estilo de vida</i>	18		
<i>Salud y estado</i>	18		
Impactos a largo plazo y recuperación	18		

Introducción

Los ecosistemas marinos y los hidrocarburos

El entorno marino es una red dinámica y diversa de hábitats y especies, entretejida por complejos procesos físicos y ecológicos que interactúan con los seres humanos y sus actividades en muchos niveles. Los hábitats marinos y sus comunidades relacionadas a menudo se agrupan en diferentes ecosistemas, como por ejemplo en el océano abierto, las aguas profundas, los arrecifes de coral, las marismas, las costas rocosas, etc., aunque todos ellos están conectados y los efectos en un ecosistema pueden afectar a los demás. La estructura y la función de los ecosistemas son características importantes al momento de evaluar los impactos. Los múltiples beneficios que los seres humanos reciben de estos hábitats y comunidades se conocen como servicios de los ecosistemas. Los más obvios son los peces, los mariscos y otros alimentos que consumimos, así como los beneficios recreativos o estéticos derivados del mar. Además de ello, muchas comunidades costeras poseen fuertes lazos culturales y espirituales con el mar. Sin embargo, también existen muchos otros servicios que son menos obvios.

El plancton marino de las vastas áreas de los océanos abiertos desempeña un importante papel en el mantenimiento de nuestra atmósfera mediante la transferencia de carbono hacia las aguas profundas. Los océanos abiertos y las zonas de aguas profundas también son el hogar de muchos de los peces que atrapamos para alimento, aunque su abundancia y productividad aumentan en gran medida en las aguas menos profundas y más cerca de las zonas costeras. Los humedales costeros y algunos ecosistemas de aguas poco profundas, incluidas las marismas, los manglares, los bosques de algas y los lechos de algas marinas, son especialmente productivos, proporcionando mucho del material orgánico que alimenta a los ecosistemas

Los servicios de los ecosistemas del entorno marino; que el mar siga siendo limpio, productivo y saludable es beneficioso para todos.



vecinos de aguas poco profundas. También proporcionan alimento y refugio para los juveniles y muchas otras especies, protegen nuestras costas de las tormentas e inundaciones, y capturan los sedimentos y los desechos orgánicos que se escurren desde la tierra. Los manglares y los arrecifes de coral también proporcionan materiales de construcción, y cada vez se desarrollan más y nuevos productos farmacéuticos a partir de la enorme diversidad de especies marinas.

La biodiversidad (es decir, la variedad de la vida) es, en sí misma, una característica valiosa de estos ecosistemas, ya que aumenta la complejidad de las cadenas alimentarias y otros procesos ecológicos, lo que a su vez aumenta su capacidad de resistencia ante los impactos naturales y antropogénicos. La mayoría de las cadenas alimentarias marinas incluyen una gama de productores primarios (es decir, plantas y algas, incluido el fitoplancton, que toman su energía de la luz solar o de los organismos que utilizan la energía química en los respiraderos de aguas profundas), bacterias (que se alimentan principalmente de carbono orgánico disuelto), herbívoros (zooplancton, invertebrados del lecho marino y algunos peces), carnívoros, carroñeros y parásitos (una amplia gama de animales) y descomponedores (particularmente bacterias y hongos). La biodiversidad y otros servicios de los ecosistemas se ven reflejados en los regímenes regulatorios nacionales e internacionales que reconocen la necesidad de la conservación y la protección de hábitats y especies importantes. Esto incluye la designación de áreas protegidas.

Los aceites minerales (es decir, el petróleo) se derivan de material vegetal y de animales que se originaron hace millones de años, y que se han modificado con el tiempo debido al calor y la presión subterránea. En muchos lugares, estos depósitos subterráneos de petróleo están conectados a la superficie por medio de peculiaridades geológicas como fallas o domos de sal, y en algunas zonas se producen filtraciones naturales a través del lecho marino. Estas filtraciones de petróleo de origen natural han estado presentes en los océanos del mundo durante millones de años, y los organismos marinos han evolucionado para desarrollar mecanismos moleculares que les permiten biodegradar y destoxificar esas sustancias e incorporarlas a la cadena alimentaria. Existen niveles naturales básicos de hidrocarburos de origen *petrogénico* (ver el recuadro 1 en la página 7) en el agua de mar y en los sedimentos del lecho marino, y son mayores en algunas áreas que en otras, dependiendo de la prevalencia de las filtraciones de petróleo. Desde la revolución industrial, estos niveles naturales se han visto acompañadas por emisiones aéreas, escurrimientos en tierra y aportaciones del transporte marítimo. El Consejo Nacional de Investigación de los Estados Unidos (US National Research Council) estima que aproximadamente la mitad del petróleo que cada año ingresa a los océanos del mundo es de origen antropogénico, mientras que la otra mitad es de origen natural producto de las filtraciones.

Los derrames de hidrocarburos grandes son raros, pero pueden dar lugar a efectos adversos considerables y de largo plazo. La magnitud de los impactos de un derrame puede variar desde los mínimos (por ejemplo, luego de un derrame de hidrocarburos ligeros en el océano abierto) con poco o ningún efecto detectable y una duración de tan solo unas pocas horas o días, hasta los significativos (por ejemplo, grandes cantidades de hidrocarburos pesados en hábitats de humedales protegidos) con efectos a largo plazo. Los derrames más grandes tienen el potencial de causar un daño mayor que los más pequeños, pero el nivel de impacto varía considerablemente dependiendo del tipo de hidrocarburo y del impacto, las condiciones locales (como la estación, el clima y el lugar) y los recursos presentes.

El desarrollo de la exploración petrolera en entornos polares y de aguas profundas conlleva una serie de desafíos para la respuesta y la ciencia de los derrames de hidrocarburos. Las plantas y los animales en los ecosistemas de aguas frías tienden a ser de vidas más largas y de crecimiento más lento que los de climas y aguas más cálidas, y la velocidad de muchos de los procesos biológicos es relativamente lenta. La persistencia de hidrocarburos, un factor importante en la recuperación del hábitat, también podría aumentar en latitudes más altas. Por lo tanto, a menudo se asume que la recuperación de los derrames de hidrocarburos llevará más tiempo, pero esto depende de muchos otros factores. Los estudios han demostrado que los microbios presentes en los ecosistemas de agua fría pueden degradar rápidamente los hidrocarburos cuando no hay otras condiciones limitantes presentes.

Los esfuerzos de respuesta ante derrames de hidrocarburos están diseñados de diversas maneras para eliminar la contaminación del hidrocarburo, aumentar su biodegradación y evitar que llegue a las partes más sensibles del ecosistema, pero pueden causar daños adicionales al medio ambiente. En algunas situaciones es necesario tener en cuenta las ventajas y desventajas y evaluar los beneficios ambientales netos de las opciones de respuesta. La ciencia sustenta la evaluación de riesgos medioambientales y la gestión de las operaciones, incluidas las decisiones de respuesta ante derrames de hidrocarburos. Nuestro conocimiento se basa en la gran cantidad de evidencias a partir de estudios de derrames anteriores y la investigación experimental.

Propósito de este documento

El propósito de este documento es proporcionar una visión general de cómo los derrames de hidrocarburos pueden afectar los recursos y las funciones ecológicas del mar, y de cuán rápido pueden recuperarse dichos recursos y funciones. Está basado en evidencia científica documentada, incluye referencias a estudios específicos, y está dirigido a la comunidad de respuesta contra derrames que consta de operadores, gobiernos, empresas y público en general.

La primera sección, titulada *Los hidrocarburos en el entorno marino*, describe las propiedades de los aceites minerales y los procesos físicos por los que atraviesa los hidrocarburos derramados y que son relevantes para los impactos ecológicos marinos. Se hace hincapié en las propiedades y procesos que afectan la persistencia de los hidrocarburos, ya que es más probable que tenga una influencia sobre los efectos a largo plazo.

La sección sobre los *Impactos ecológicos y recuperación* ofrece una descripción general de los mecanismos y factores que suelen afectar a los impactos de los derrames de hidrocarburos sobre los recursos marinos y sus tasas de recuperación.

La tercera sección, *Impactos de los derrames de hidrocarburos sobre la vida marina y la fauna relacionada*, describe algunos de los impactos más comunes de los derrames de hidrocarburos sobre las formas de vida asociadas a los diferentes ecosistemas, e incluye referencias a estudios de casos relevantes.

La sección titulada *Manejo del impacto potencial y de la respuesta ante derrames de hidrocarburos* toma en consideración las buenas prácticas actuales en la respuesta a los derrames y cómo están diseñadas para minimizar el daño medioambiental (es decir, maximizar el beneficio medioambiental neto de las técnicas de respuesta).

La quinta sección, titulada *Evaluación de daños del derrame de hidrocarburos: actividades clave*, resume algunos de los enfoques y requisitos fundamentales de una evaluación de daños, y el monitoreo de seguimiento necesario para describir la recuperación.

Por último, la sección de *Referencias y lecturas adicionales* proporciona una lista de referencias importantes y publicaciones relevantes.

La serie Guía de Buenas Prácticas de IPIECA-IOGP incluye otros títulos que también podrían ser de interés para el lector, en particular, la Guía de Buenas Prácticas titulada *Impactos de los derrames de hidrocarburos en las costas* (IPIECA-IOGP, 2015a) que proporciona una discusión más detallada sobre el destino y los efectos de los derrames de hidrocarburos en el mar sobre los recursos del litoral. Otros títulos relevantes cubren temas como el análisis de beneficio ambiental neto (IPIECA- IOGP, 2015b) y el uso de dispersantes, tanto en la superficie del mar (IPIECA- IOGP, 2015c) como bajo la superficie del mar (IPIECA- IOGP, 2015d). Si le interesa una discusión sobre los impactos de los derrames de hidrocarburos en las costas tierra adentro/ de agua dulce de los lagos y ríos, consulte la Guía de Buenas Prácticas de respuesta tierra adentro (IPIECA-IOGP, 2015e).

Petróleo en el entorno marino

Composición y características de los hidrocarburos

Los petróleos crudos son mezclas complejas de hidrocarburos, con pequeñas cantidades de otros compuestos (ver Recuadro 1) y elementos que normalmente incluyen azufre y otros elementos traza. Los productos refinados, desde la gasolina hasta el betún asfáltico, también se componen principalmente de hidrocarburos, y se producen a partir del petróleo crudo por medio de diversos procesos de refinado para conseguir las características químicas y físicas deseadas.

Los hidrocarburos se pueden clasificar en diferentes grupos en función de su estructura química, pero las características que son más relevantes para su destino en el entorno marino son sus pesos moleculares y puntos de ebullición (por lo general muy parecidos), su solubilidad en agua y biodisponibilidad (también estrechamente relacionados). Los compuestos con los pesos moleculares más bajos suelen tener los puntos de ebullición más bajos y son volátiles a bajas temperaturas ambientales. Muchos de estos compuestos podrían mostrar una toxicidad aguda (ver el Recuadro 2 en la página 9), pero al alcanzar la superficie del mar o la costa se evaporan tan rápidamente que su contribución a los impactos marinos es generalmente pequeña. Si se liberan en el fondo del mar presentan una mayor contribución a la toxicidad, aunque estos compuestos de bajo peso molecular, generalmente se biodegradan rápidamente. En el otro extremo de la balanza, los hidrocarburos de alto peso molecular (por ejemplo, los asfáltenos, un componente principal del betún asfáltico) tienen un alto punto de ebullición, son resistentes a la biodegradación y son muy persistentes. También pueden ser crónicamente tóxicos, pero generalmente son mucho menos biológicamente disponibles debido principalmente a su muy baja solubilidad en agua. Entre estos dos extremos existe una amplia gama de hidrocarburos, muchos de los cuales tienen el potencial de causar impactos biológicos.

Recuadro 1 Tipos y grupos de hidrocarburos

Hidrocarburos: los verdaderos hidrocarburos solo contienen carbono e hidrógeno. Los petróleos crudos normalmente también contienen una proporción de otros compuestos orgánicos que son principalmente de carbono e hidrógeno, pero con algo de nitrógeno, azufre y oxígeno. Para los fines de este documento, el término hidrocarburo se utiliza genéricamente para incluir a todos estos compuestos orgánicos.

Hidrocarburos aromáticos: responsables de la mayor parte de la toxicidad en el petróleo, y tienen uno o más anillos bencénicos:

- El benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (compuestos BTEX) tienen un anillo y son relativamente solubles en agua, pero también son volátiles (punto de ebullición muy bajo).
- Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) tienen dos o más anillos:
 - el naftaleno y los derivados sustituidos con alquilo son compuestos con dos anillos, y tienen una solubilidad en agua y volatilidad moderadas;
 - los compuestos de tres y de cuatro anillos son ligeramente solubles en agua y no son volátiles (punto de ebullición alto); y
 - los compuestos con cinco o más anillos son efectivamente insolubles en agua y tienen un punto de ebullición alto.

Hidrocarburos del grupo 1 al 5: la industria del petróleo categoriza los hidrocarburos en cinco grupos en función de su peso específico, desde el Grupo 1, con un peso específico muy bajo ($< 0,8$; por ejemplo: queroseno) hasta el Grupo 5, con un peso específico muy alto ($\geq 1,0$; por ejemplo: betún asfáltico). Esta agrupación es útil cuando se discute el destino y la persistencia de los derrames de hidrocarburos.

Hidrocarburos petrogénicos, pirogénicos y biogénicos: derivados directamente de aceites minerales, la combustión incompleta de combustibles fósiles y procesos biológicos, respectivamente.

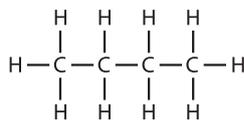
La evaluación de la toxicidad de los compuestos de hidrocarburos (ver el Recuadro 2 en la página 9) no es sencilla y está influenciada por muchos factores. Sin embargo, los hidrocarburos aromáticos, en particular los HAP, tienden a tener una mayor toxicidad que otros grupos de hidrocarburos. Sus concentraciones (como HAP totales o HAP individuales) a menudo son analizadas y monitoreadas en el agua, los sedimentos y los tejidos de origen animal como un indicador de contaminación tóxica. Muchos compuestos aromáticos de bajo peso molecular tienen una relativamente alta solubilidad en agua y por lo tanto disponibilidad biológica, así como también una baja persistencia. Estos pueden ser responsables de la mayoría de los efectos narcóticos que causan impactos agudos. De mayor preocupación son algunos de los HAP de peso molecular medio que son menos solubles, pero más persistentes y tan altamente tóxicos que las pequeñas cantidades que se vuelven biológicamente disponibles tienen el potencial de causar impactos crónicos a largo plazo. Incluso los compuestos aromáticos de alto peso molecular, tales como los asfaltenos, podrían causar algunos efectos crónicos en un organismo si está estrechamente asociados con un residuo de alquitrán durante un tiempo suficiente.

Los HAP pueden ingresar al entorno marino procedentes de diversas fuentes, no solo a partir de derrames de hidrocarburos. La deposición atmosférica de partículas derivadas de la combustión incompleta del carbón, petróleo y muchos otros materiales provoca ingresos significativos de HAP *pirogénicos* a los ecosistemas naturales.

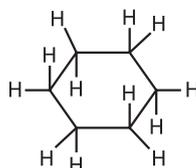
Las propiedades de un hidrocarburo entero están en función de sus compuestos constituyentes. Las propiedades físicas más importantes son la densidad (o peso específico), la viscosidad, el punto de escurrimiento (la temperatura por encima de la cual se escurrirá); y las propiedades químicas clave son el contenido de aromáticos, cera y asfaltenos. Los productos del petróleo ligero tienen una baja densidad y viscosidad y, a menudo un alto contenido aromático, por lo que a menudo son muy tóxicos, pero es poco probable que sean persistentes en la mayoría de los entornos. Los petróleos crudos pesados y combustóleos tienen una densidad y viscosidad relativamente altas, y son mucho más propensos a ser persistentes, pero también pueden ser tóxicos en función de su composición. Todas estas propiedades son propensas a cambiar una vez que el hidrocarburo se ha derramado (ver *El destino de los hidrocarburos* en las páginas 9-14).

Las definiciones de la terminología relacionada con la toxicología se presentan en el Recuadro 2 de la página siguiente. Sin embargo, cabe señalar que los principales efectos medioambientales de los derrames de hidrocarburos normalmente se deben a la capa física del derrame o a la asfixia de plantas y animales, especialmente en hábitat costeros, en lugar de debido a la toxicidad del hidrocarburo.

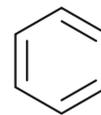
Figura 1 Ejemplos de la estructura de los compuestos químicos en los petróleos crudos



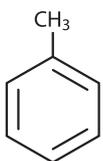
alcano



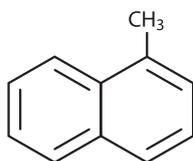
cicloalcano



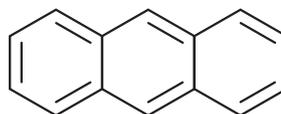
benceno



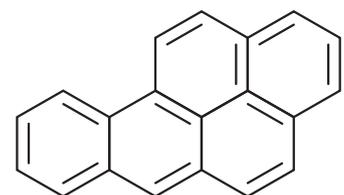
1-anillo: tolueno



2 anillos: 2-metilnaftaleno



3 anillos: antraceno



5 anillos: benzo(a)pireno

Recuadro 2 Toxicología

Vulnerabilidad y sensibilidad al hidrocarburo: la vulnerabilidad describe la probabilidad de que un recurso estará expuesto al hidrocarburo. La sensibilidad asume que el recurso está expuesto al hidrocarburo y describe el efecto relacionado con la exposición. Por lo tanto, un coral de aguas profundas podría ser sensible, pero no es vulnerable a un derrame de hidrocarburos en la superficie, mientras que las algas de una costa rocosa podrían ser vulnerables, pero no sensibles.

Toxicidad es el potencial o la capacidad de un material para tener efectos adversos en los organismos vivos; la toxicidad acuática es el efecto de los productos químicos sobre los organismos acuáticos. Ya que cualquier sustancia tiene el potencial de ser tóxica, el organismo específico y su exposición a la sustancia siempre debe tomarse en cuenta.

Exposición es la combinación de la **duración** de la exposición a la sustancia química y de la **concentración** de la sustancia química.

Vía de exposición es la forma en que el organismo queda expuesto a la sustancia, incluida la ingestión (directamente o en los alimentos), la absorción a través de las branquias o el contacto con la piel.

La **magnitud** de un efecto tóxico depende de la sensibilidad de un organismo a los productos químicos, pero también está en función tanto de la concentración como de la duración de la exposición a la sustancia química.

Toxicidad aguda y crónica: La toxicidad aguda involucra efectos nocivos en el organismo a través de una exposición única o de corto plazo. La toxicidad crónica es la capacidad de una sustancia o de una combinación de sustancias de tener efectos nocivos durante un período prolongado, por lo general después de una exposición repetida o continua, a veces durante toda la vida del organismo expuesto. Los efectos agudos y crónicos pueden ser de baja o alta magnitud, pero los crónicos a menudo involucran una baja magnitud, y pueden ser sutiles y difíciles de detectar.

Biodisponibilidad es el grado en que un producto químico está disponible para su absorción en un organismo y, con respecto a los derrames de hidrocarburos, está general y estrechamente relacionada tanto con la toxicidad como con la tasa de biodegradación.

Bioacumulación se produce cuando un organismo absorbe una sustancia tóxica en sus tejidos a una velocidad mayor que aquella en la que se elimina dicha sustancia.

Efectos letales y subletales: un efecto letal provoca la muerte de un organismo, mientras que un efecto subletal provoca una reducción de la función biológica o de la salud, por ejemplo, su crecimiento, capacidad de reproducirse o el estado de su piel.

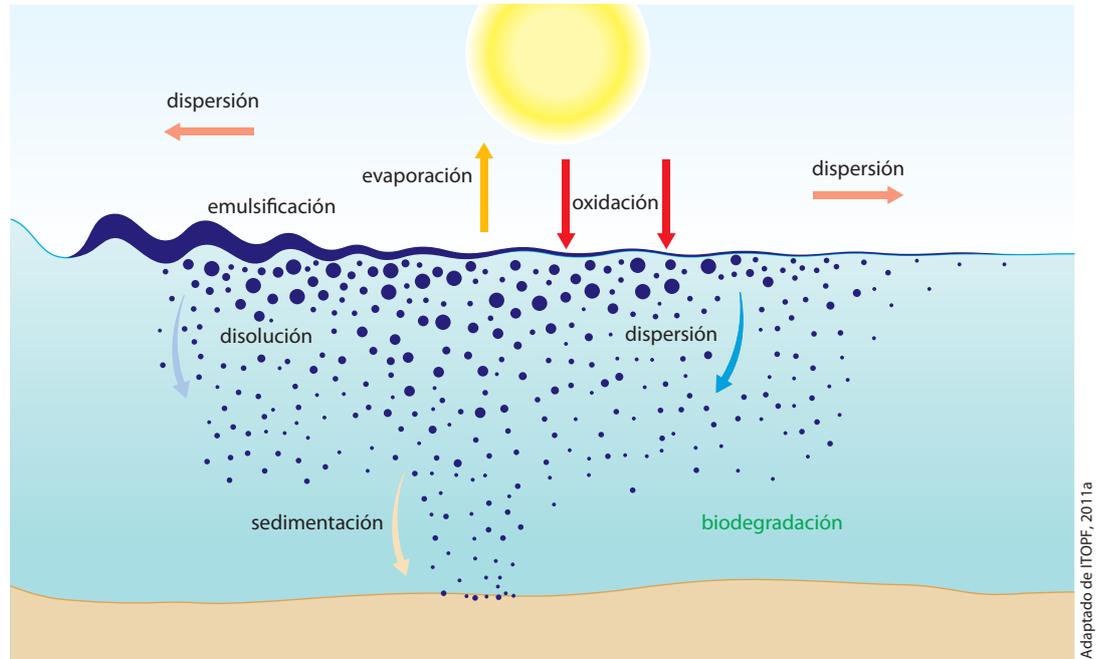
Biomarcador: este término tiene dos usos muy diferentes, ambos de los cuales son relevantes para este documento:

- i) una medición bioquímica o fisiológica subletal específica que se utiliza como un indicador de la exposición a un contaminante (por ejemplo HAP) en un animal; o
- ii) un compuesto de hidrocarburo que se encuentra en el petróleo que fue producido originalmente por organismos vivos y en su mayoría permanece sin cambios (a veces conocido como un "fósil molecular") y que se usa en el análisis de hidrocarburos para caracterizar de forma única un petróleo en particular (es decir, para obtener su "huella digital").

El destino de los hidrocarburos

Tan pronto como el hidrocarburo se derrama en el entorno marino se convierte en objeto de una serie de procesos naturales, conocidos como "meteorización", el cual de forma rápida y progresiva cambia su carácter y redistribuye gran parte del mismo hacia otras partes del entorno. La importancia de cada proceso sobre el destino del hidrocarburo depende del lugar donde se produce el derrame (es decir, las condiciones medioambientales) y del tipo de hidrocarburo (es decir, las propiedades químicas y físicas descritas en las páginas 7-8). El mecanismo y la magnitud de los efectos ecológicos están influenciados en gran medida por el destino del hidrocarburo. Los principales procesos de envejecimiento se describen en las páginas 10-14.

Figura 2 Procesos de envejecimiento de los hidrocarburos



Evaporación

La mayoría de los petróleos frescos contienen una proporción de hidrocarburos de bajo peso molecular que poseen un bajo punto de ebullición (por ejemplo, alcanos con < 12 átomos de carbono y compuestos BTEX). Cuando se liberan en el mar o en la costa, la evaporación de estos hidrocarburos hacia la atmósfera comenzará de inmediato, influenciada por la temperatura ambiente y el movimiento del aire. Este proceso aumenta progresivamente la viscosidad del hidrocarburo derramado, y al mismo tiempo reduce el volumen y la toxicidad aguda del hidrocarburo remanente. Si el hidrocarburo permanece en la superficie durante muchas horas o días, este proceso de envejecimiento puede dejar un residuo pegajoso con una toxicidad relativamente baja. La proporción de hidrocarburo remanente puede variar desde casi nada hasta casi todo el hidrocarburo derramado originalmente. Por ejemplo, 10 toneladas de gasolina derramadas en un mar tropical en un día tranquilo de verano (25 °C) se evaporarán por completo en menos de tres horas, y tomarían solo seis horas para evaporarse en un mar ártico en un día tranquilo de invierno (5 °C); sin embargo, bajo las mismas condiciones, el combustóleo pesado (por ejemplo, Bunker C) habría perdido solo el 20% y el 15% de su volumen, respectivamente, por evaporación después de cuatro días (fuente: NOAA, 2015).

Extensión y movimiento

Si el hidrocarburo se derrama sobre la superficie del mar entonces se extenderá, aunque no haya ningún movimiento debido a las mareas o los vientos. La velocidad de extensión depende del punto de escurrimiento y viscosidad del hidrocarburo: los petróleos ligeros se extenderán muy rápidamente, bajo cualquier temperatura del mar, pero los petróleos pesados se extenderán más lentamente y permanecerán más espesos durante más tiempo, sobre todo en mares fríos donde esto también puede reducir la tasa de dispersión (ver más adelante). Cualquier forma de vida en la superficie o animales que necesiten llegar a la superficie para respirar serán vulnerables a una mancha de hidrocarburo, y la velocidad y dirección de los vientos y las mareas influirán en la distancia y amplitud de la extensión de la mancha de hidrocarburo.

Mientras más se extiende y se mueve el hidrocarburo, más rápido empezará a fragmentarse, lo que da como resultado manchas y la formación de numerosas manchas de hidrocarburo. El espesor del hidrocarburo a menudo se vuelve muy desigual, con áreas dispersas de hidrocarburo más grueso separadas por grandes extensiones de hidrocarburo muy delgado (lustroso) o agua clara.

Disolución

Aunque la mayoría de los hidrocarburos tienen una baja solubilidad en el agua (incluida el agua de mar) que en efecto podemos definirlos como insolubles, algunos de los hidrocarburos aromáticos más pequeños, tales como el benceno y el tolueno, son relativamente solubles. Por lo tanto, cuando el hidrocarburo se derrama en el mar, una pequeña proporción se disuelve; la cantidad y la velocidad de disolución depende de la composición y la viscosidad del hidrocarburo. Esta *fracción soluble en agua* tiene un impacto desproporcionado sobre los organismos marinos, siendo más biodisponible que otros hidrocarburos y, a menudo, mucho más tóxico. Las altas concentraciones de estos hidrocarburos generalmente se limitan al agua en la proximidad inmediata del hidrocarburo derramado y se produce una dilución rápida tanto vertical como lateralmente. La biodegradación de los hidrocarburos solubles en agua es generalmente rápida.



Esta fotografía muestra petróleo del derrame de la Guerra del Golfo de 1991 extendiéndose hacia el sur desde las aguas de Kuwait bajo la influencia de los vientos y las mareas. Gran parte del petróleo llegó a las costas de Arabia Saudita y otra parte del mismo viajó más de 500 kilómetros desde el punto de origen. Los procesos de meteorización cambiaron progresivamente el carácter del petróleo.

Dispersión

La acción de las olas, u otra agitación del hidrocarburo sobre (o dentro) del agua, dará lugar a la formación de pequeñas gotas de hidrocarburo que se mezclan en la columna de agua; mientras mayor sea la agitación, mayor será el potencial de mezcla. La mayor parte de los hidrocarburos en la mayoría de los derrames, ya sea sobre la superficie del mar, liberado en el fondo del mar o depositado sobre la costa, se dispersa con el tiempo. Las gotas más grandes mezcladas en la columna de agua resurgen rápidamente, pero las gotas más pequeñas tienen menos flotabilidad y no resurgen; se mezclan horizontal y verticalmente en la columna de agua. La extensión y profundidad de la mezcla depende de la acción de las olas y de las corrientes de agua. Este proceso puede conducir potencialmente a que la vida marina bajo la superficie quede expuesta a la contaminación. Sin embargo, como en el caso de los hidrocarburos disueltos, las concentraciones de hidrocarburo dispersado son más altas en la proximidad inmediata del derrame, ya sea una mancha de hidrocarburo superficial o una columna que surge desde abajo de la superficie, y que se reduce rápidamente a medida que el hidrocarburo se dispersa más lejos del origen. En el caso de mareas negras en la superficie, la flotabilidad de las gotas de hidrocarburo significa que la mezcla vertical en aguas más profundas es más lenta que la mezcla lateral, y las concentraciones elevadas se limitan generalmente a unos cuantos metros en la parte superior. Las gotas de hidrocarburo dispersadas tienen una gran área superficial y ello facilita la biodegradación por parte de los microorganismos (ver la página 14). La eficacia de la biodegradación de las gotas de hidrocarburo es un beneficio clave de la utilización de dispersantes químicos para mejorar el proceso de dispersión natural.

Emulsificación

Las gotas más grandes de hidrocarburo dispersado resurgirán rápidamente y pueden atrapar gotas de agua de mar dentro de la superficie de la mancha de hidrocarburo para formar una emulsión de agua en aceite. Por lo tanto, la mayoría de los hidrocarburos incorporarán progresivamente agua cuando se mezclan en condiciones turbulentas (es decir, en los mares moderados o agitados). Cuanto mayor sea el efecto de mezcla, más agua se incorporará a la emulsión, por lo que el volumen de la misma aumentará; en algunas circunstancias el volumen de una emulsión de agua en aceite puede ser hasta cinco veces mayor que el volumen del hidrocarburo derramado originalmente.

Las emulsiones pueden ser estables o inestables, y pueden tener características físicas muy diferentes al hidrocarburo de origen. Las emulsiones estables normalmente tienen un alto contenido de agua (a veces mayor del 70%) y por lo general son altamente viscosas. Estas pueden permanecer estables durante varias semanas, y coloquialmente se conocen como “espuma de chocolate” (o, a veces simplemente “espuma”) debido a su consistencia y color marrón rojizo. La formación de una espuma estable puede reducir en gran medida la velocidad de dispersión y otros procesos de destino. En condiciones tranquilas y cálidas, por ejemplo, después de llegar a una playa, una espuma podría descomponerse en sus partes constituyentes de aceite y agua, pero algunas emulsiones son altamente persistentes. Una emulsión inestable podría descomponerse después de varios días, o podría persistir por un espacio tan corto como 24 horas. Las emulsiones inestables generalmente conservan el color del petróleo original, es decir, marrón oscuro o negro.

Sedimentación

El destino y los efectos de los hidrocarburos dispersados están influenciados en gran medida por la cantidad de sólidos en suspensión (sedimentos finos y otras partículas) presentes en la columna de agua. Las gotas de hidrocarburo dispersadas se pueden unir a los sólidos en suspensión y cambiar sus características físicas. Es menos probable que las gotas dispersadas químicamente se unan a sólidos en comparación con las gotas dispersadas físicamente hasta que el dispersante se haya biodegradado. La deposición de estos sólidos en suspensión hacia el lecho marino puede ocurrir, en cuyo caso podrían incorporarse a las áreas fangosas del lecho marino con sedimentación activa o distribirse más ampliamente como una agrupación suelta (floculación) de partículas de impregnadas de hidrocarburos, o una combinación de ambas. En el peor de los casos, donde las concentraciones de gotas de hidrocarburo y sedimentos en suspensión son altas, la pesada deposición de partículas contaminadas podría dar lugar a sedimentos del fondo marino gravemente impregnados de hidrocarburos, pudiendo persistir durante años y potencialmente tener efectos a largo plazo. Un ejemplo notable se produjo en dos estuarios de la costa del noroeste de Francia luego del derrame de hidrocarburos del *Amoco Cádiz* de 1978 (ver la página 25). Afortunadamente, este tipo de condiciones son inusuales y la mayoría del hidrocarburo dispersado está más ampliamente distribuido y es biodegradado antes de que se pueda incorporar a los sedimentos del fondo marino. Sin embargo, la presencia de flóculos sueltos de partículas impregnadas de hidrocarburos (es decir, material floculante formado por la agrupación de partículas de hidrocarburo y de sedimentos en suspensión) puede provocar que los animales que se alimentan por filtración en el lecho marino queden expuestos a concentraciones elevadas de hidrocarburos.

Hundimiento

El hundimiento se discute a menudo junto con la sedimentación (descrita línea atrás), pero desde una perspectiva ecológica es muy diferente, ya que no produce columnas o flóculos de partículas impregnadas e hidrocarburos. El hundimiento ocurre si el hidrocarburo derramado es más denso que el agua de mar, y puede dar lugar a acumulaciones muy persistentes que yacen en el fondo marino y que a veces llegan a enterrarse. El área impactada del fondo marino normalmente es menor que la afectada por la sedimentación del

hidrocarburo dispersado, pero el hidrocarburo hundido puede causar una asfixia a largo plazo y la pérdida del hábitat. No existen muchos hidrocarburos que sean así de densos, incluso después de mucho envejecimiento. Sin embargo, unos cuantos hidrocarburos altamente densos, incluidos los hidrocarburos del Grupo 5 (ver el Recuadro 1) y algunos otros que pueden envejecer y formar una alta densidad, pueden hundirse en algunas circunstancias. Por ejemplo, la arena arrastrada por el viento a veces se puede depositar sobre el hidrocarburo flotante provocando su hundimiento, y las capas de agua dulce que flota en la superficie del mar, cerca de los ríos o los témpanos de hielo puede reducir la

En algunas costas de Luisiana, durante el impacto del pozo Macondo que ocurrió en el Golfo de México en 2010, el petróleo se mezcló con la arena de la zona de rompientes, hundiéndose y formando láminas de petróleo en las zonas submareales bajas e intermareales inferiores.



densidad del agua de mar, permitiendo así que el hidrocarburo se hunda. Los residuos quemados de hidrocarburos pueden ser más pesados que el agua de mar y por lo tanto propensos a hundirse. Aunque tales circunstancias no son comunes, el hidrocarburo derramado a menudo llega a la costa en las playas de arena y se mezcla con la arena en la zona de rompientes, lo que resulta en la formación de bolas de alquitrán y láminas de alquitrán que pueden hundirse en la zona submareal baja justo al lado de la playa. Del mismo modo, estas podrían ser persistentes y convertirse en una fuente potencial de contaminación (crónica) a largo plazo, aunque la toxicidad del hidrocarburo queda atrapada en gran parte dentro de la matriz de alquitrán por lo que tiene una biodisponibilidad bastante limitada.

Encallamiento en la costa

Los procesos descritos anteriormente reducen progresivamente la cantidad de hidrocarburo en una mancha de hidrocarburo en la superficie, por lo que es posible que un derrame de hidrocarburos en el mar provoque que ninguna parte del hidrocarburo, o solo pequeñas cantidades de este, llegue a la orilla. Sin embargo, la mayoría de los derrames moderados o grandes provocan que al menos una parte del hidrocarburo llegue a la costa, lo que después podría afectar a toda la gama de hábitats y especies presentes por debajo del nivel de la marea alta, y, a veces por encima de dicho nivel.

Los procesos físicos y químicos naturales continuarán envejeciendo el hidrocarburo y gradualmente llegarán a eliminarlo, pero la velocidad de eliminación varía mucho y depende de una serie de factores. La persistencia será mayor en lugares que están protegidos de la acción de las olas y del movimiento del agua, aunque solo se requieren pequeñas cantidades de acción de las olas para eliminar el hidrocarburo. Los residuos que permanecen durante más de un año o dos generalmente solo se encuentran en situaciones demasiado protegidas, o en lugares donde han sido profundamente enterrados. Para obtener más información sobre el destino de los hidrocarburos en la costa consulte la Guía de Buenas Prácticas de IPIECA-IOGP sobre los impactos de los derrames de hidrocarburos en las costas (IPIECA- IOGP, 2015a).



En algunas situaciones los procesos naturales pueden eliminar muy rápidamente el hidrocarburo en la costa. La fotografía anterior muestra una orilla expuesta a las olas en Milford Haven, Gales, donde el petróleo crudo del derrame del Sea Empress de 1996 sofocó la arena y las rocas con un espesor de varios centímetros en algunos lugares. Al cabo de dos meses (arriba a la derecha), la mayor parte del petróleo se había eliminado por acción de las olas y por limpieza manual; luego de un año ya no había petróleo visible. En otras situaciones (derecha) el petróleo puede persistir en la costa durante muchos años, como lo demuestra este residuo alquitranado de gran espesor resultante de un derrame en el Golfo Pérsico.



Fotooxidación

Los hidrocarburos expuestos a la luz ultravioleta (UV) se pueden oxidar fotoquímicamente para formar otros compuestos. Esto es a menudo un componente menor del proceso de envejecimiento pero los HAP son particularmente sensibles. Los estudios de laboratorio de algunos compuestos han encontrado que los productos resultantes pueden ser más tóxicos que los compuestos de origen, en gran parte debido a que son más solubles en agua. Este aumento en la biodisponibilidad también aumenta su potencial de biodegradación. La medida en que la luz UV tiene algún efecto sobre los hidrocarburos enteros y sobre la toxicidad general en el entorno natural es objeto de investigaciones en curso.

Biodegradación

Las bacterias marinas han evolucionado para producir enzimas que les permiten utilizar los hidrocarburos del petróleo crudo como fuente de alimento. Crecen y se multiplican al metabolizar los hidrocarburos, y a su vez se convierten en una fuente de alimento para otros organismos. Es a través de este proceso natural que la mayor parte de los hidrocarburos de un derrame se biodegradan en última instancia, y la energía y los materiales contenidos en los mismos regresan a la cadena alimentaria. La degradación requiere cantidades adecuadas de oxígeno, nutrientes y elementos traza, y su velocidad depende principalmente de la relación de área superficial con el volumen del hidrocarburo; es decir, las gotas dispersadas finamente se degradarán rápidamente mientras que una mancha de hidrocarburo espesa o una mancha de hidrocarburos en la costa se degradarán lentamente. Las moléculas grandes de hidrocarburos no se biodegradan fácilmente y pueden persistir durante muchos años; estas incluyen algunos HAP que son potencialmente tóxicos pero que tienen una muy baja solubilidad en agua y, por tanto, su disponibilidad biológica es muy limitada. Algunos de los hidrocarburos más grandes, tales como los asfaltenos (utilizados para el asfalto de carreteras), son tan resistentes a la biodegradación que una mancha de alquitrán podría persistir durante cientos de años aunque estando efectivamente inerte. Las bacterias que pueden degradar los hidrocarburos están presentes en todas partes, aunque no siempre en grandes densidades, por lo que puede haber un retraso de tiempo antes de que se hayan multiplicado lo suficiente para que su actividad pueda volverse notoria. Las velocidades de biodegradación pueden estar limitadas por las concentraciones de nutrientes disponibles que los microbios requieren para multiplicarse y crecer. La falta de oxígeno también puede ser un factor limitante en algunas situaciones, particularmente en sedimentos fangosos. Las temperaturas frías reducen la velocidad de biodegradación, pero no necesariamente en una gran medida. Estudios recientes de situaciones en aguas profundas en el Golfo de México muestran que las bacterias se adaptan a condiciones de 5 °C estables y pueden degradar el petróleo rápidamente si este se dispersa adecuadamente.

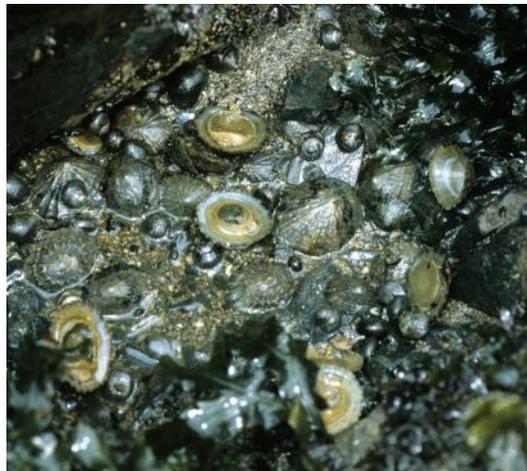
Impactos ecológicos y recuperación

Exposición a los hidrocarburos y mecanismos de efecto

Como se describe en la sección anterior, los hidrocarburos derramados pueden ser distribuidos hacia un número de diferentes hábitats y de distintas formas. En algunas situaciones graves y poco comunes, los depósitos pesados persistentes en las zonas de la costa o de los lechos marinos pueden provocar la pérdida a largo plazo del hábitat natural, pero existen muchos otros efectos posibles de la exposición a los hidrocarburos. En función de dónde y cómo vive un organismo, este podría estar expuesto a los hidrocarburos de una variedad de maneras, y el mecanismo de cualquiera de los efectos también puede variar. Los animales y las plantas que viven o pasan tiempo en la superficie del mar o en la costa, probablemente los mayores impactos se deberán a la asfixia física, pero también podrían quedar expuestos y ser afectados de otras maneras. Por ejemplo: los animales que respiran aire podrían inhalar hidrocarburos volátiles o ingerir hidrocarburos junto con sus alimentos o al acicalarse; algunos animales y plantas podrían absorber los hidrocarburos a través de la piel u otras superficies; y muchos animales tienen membranas mucosas sensibles que reaccionan ante la exposición directa a los hidrocarburos. En la columna de agua, los hidrocarburos disueltos podrían ser absorbidos a través de las branquias u otros tejidos expuestos, mientras que las gotas de hidrocarburo dispersadas podrían ser capturadas y tragadas por animales que se alimentan por filtración. Los animales y plantas que viven en la superficie del lecho marino poco profundo (epibiota) también pueden estar expuestos a los hidrocarburos disueltos y dispersados, pero si los hidrocarburos se incorporan al sedimento se volverán disponibles para una gama mucho más amplia de animales que habitan en los sedimentos.

Los efectos de la asfixia física en los organismos pueden incluir una reducción en la capacidad para alimentarse, moverse, respirar o reproducirse, o una pérdida de control térmico. Si los hidrocarburos son inhalados, ingeridos, absorbidos o de otro modo entran en contacto con los tejidos internos de un organismo, ello podría tener varios otros efectos. La toxicidad química de los hidrocarburos puede conducir a daños y distorsiones de las paredes celulares y de las funciones celulares a nivel molecular. Si la dosis (cantidad o concentración) y la duración de la exposición a los hidrocarburos tóxicos son lo suficientemente altas, entonces el organismo podría morir; si no es así, entonces podría presentar algunos efectos subletales o permanecer ileso. Un efecto común en muchos invertebrados marinos expuestos a hidrocarburos es el quedar temporalmente narcotizados de modo que dejan de alimentarse y no reaccionan normalmente a los estímulos. Esto puede causar la muerte si el animal se desvincula de su hábitat nativo o es comido por depredadores. Los efectos subletales de los derrames de hidrocarburos que han sido estudiados en algunos animales incluyen efectos sobre la tasa de crecimiento, la capacidad de reproducción (por ejemplo, la movilidad del esperma, el éxito en la eclosión de los huevos), la actividad fisiológica (por ejemplo, las tasas de alimentación y de reacción a los estímulos), los daños en los tejidos (por ejemplo, úlceras en la piel, deformidades larvales) y el daño genético (por ejemplo, formas alteradas de ADN).

En los últimos años, los estudios de ecotoxicología de las células y los sistemas bioquímicos en animales y plantas también han identificado una serie de indicadores de efectos subletales, colectivamente denominados *biomarcadores*, lo que podría indicar la exposición del animal a determinados contaminantes, incluidos los HAP. Algunos ejemplos son: el nivel de actividad de los sistemas enzimáticos celulares que protegen a las células mediante la degradación de productos químicos potencialmente dañinos (un indicador ampliamente estudiado); la presencia de productos de degradación de los HAP en la bilis; y el nivel de estabilidad de ciertos orgánulos celulares que también están involucradas en la



Estas lapas fueron narcotizadas por un hidrocarburo de toxicidad aguda producto del derrame del Sea Empress en Milford Haven de 1996 en Gales. Su población drásticamente reducida tuvo un efecto en cadena en toda la comunidad de la costa rocosa. Para obtener más información sobre los efectos de los derrames de hidrocarburos en las costas ver IPIECA-IOGP, 2015a.

desintoxicación. Al indicar la exposición, estos biomarcadores pueden ser utilizados en el monitoreo medioambiental general como sistemas de alerta temprana ante posibles daños en el mismo. En los estudios de derrames de hidrocarburos, estos métodos pueden proporcionar pruebas complementarias para otros estudios ecológicos y de ecotoxicología para describir el alcance y la magnitud de los efectos. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que otras condiciones pueden inducir estos biomarcadores, de modo que los niveles de los biomarcadores por sí solos no son evidencia confiable de exposición a hidrocarburos. Por otra parte, la evidencia de la exposición no indica necesariamente un daño.

Gran parte de nuestra comprensión actual de los efectos toxicológicos (letales y subletales) proviene de estudios de laboratorio donde los animales y las plantas se pueden mantener en condiciones controladas con diferentes tipos y concentraciones de hidrocarburos. Aunque estos estudios han sido valiosos, es importante tener en cuenta que es casi imposible imitar adecuadamente las condiciones de campo reales, incluidos el hábitat, los procesos ecológicos y la dilución continua del hidrocarburo con el paso del tiempo. Por lo tanto, la validación de la verdadera magnitud de los efectos toxicológicos en campo es difícil, y la interpretación de su importancia ecológica lo es aún más. Se ha desarrollado un conjunto de modelos informáticos, utilizando una serie de datos de campo y de laboratorio, para describir la magnitud y la escala geográfica de los efectos toxicológicos en el entorno marino. Los resultados validados a veces coinciden con los de los datos empíricos, pero se necesita mucha cautela y una comprensión de las limitaciones del modelo al momento de sacar conclusiones.

El grado en que un animal, planta o hábitat se verán afectados por la asfixia física dependerá de la cantidad de hidrocarburo que lo cubre, así como de otros factores que se describe a continuación. De manera similar, la dosis y la duración de la exposición a los hidrocarburos son factores críticos que afectan el nivel de los efectos tóxicos que los hidrocarburos pueden tener sobre un organismo. Las concentraciones de hidrocarburo dispersado justo debajo de una mancha de hidrocarburo superficial en aguas abiertas pueden elevarse a niveles que podrían ser altamente tóxicos en caso de persistir, pero cuya duración es generalmente corta a medida que la mancha de hidrocarburo se moviliza y que se diluye el hidrocarburo dispersado. Las concentraciones de hidrocarburo en los sedimentos de una costa impregnada de hidrocarburos podrían seguir siendo altas en algunas zonas de los sedimentos durante mucho más tiempo. Las concentraciones de hidrocarburo en una fosa en la costa rocosa con una mancha persistente de alquitrán podrían ser bajas, pero las contribuciones crónicas del contaminante podrían persistir durante muchos años. Cada situación puede tener diferentes efectos sobre los organismos individuales y, dependiendo de la magnitud y distribución de la contaminación, todos los efectos individuales podrían o no tener un efecto combinado a nivel de población o en la pérdida de los servicios de los ecosistemas. Dichos impactos también están en función de las características, el comportamiento y la conectividad de la población. Todos estos factores determinan la resistencia de la población. Para obtener más información sobre este tema, consulte IPIECA-IOGP, 2015a.

Además de los efectos directos de los hidrocarburos que se describieron anteriormente, existen muchos efectos indirectos potenciales. Si un derrame de hidrocarburos produce una reducción en la población de una especie en particular es posible que esto tenga consecuencias para las poblaciones de otras especies dentro de la misma cadena alimentaria, ya sea a nivel superior o inferior. Del mismo modo, el espacio físico desocupado por una especie afectada podría ser usurpado por otra especie oportunista, y en caso de haber cadáveres, estos proporcionarían una fuente de alimentos a corto plazo para los demás. Las complejas interacciones ecológicas dentro de las comunidades pueden conducir a muchos de estos efectos posibles (ver la sección sobre los *Impactos sobre la vida marina y la fauna relacionada* en las páginas 20-38 para obtener ejemplos). También es posible que los efectos indirectos de los derrames de hidrocarburos puedan tener un impacto en un nivel más amplio de los ecosistemas, aunque esa posibilidad todavía se encuentra en evaluación.

Factores que influyen sobre los impactos de los hidrocarburos

Está claro que los impactos de un derrame de hidrocarburos dependen enormemente de las circunstancias. El volumen del derrame es solo un factor, y no necesariamente el más importante. El origen y el tipo de hidrocarburo, la acción de las olas, la profundidad del agua, la cantidad de sedimento en el agua, los vientos y las mareas, la temperatura y la proximidad del derrame a la costa pueden marcar la diferencia entre que no haya ningún impacto detectable y un impacto severo sobre muchos recursos. La combinación de estos factores físicos y químicos también determinará qué hábitats estarán expuestos al hidrocarburo y de qué forma; por ejemplo, una mancha de hidrocarburo sobre la superficie del agua, una nube de gotas de hidrocarburos en los primeros metros de la columna de agua, una floculación de partículas impregnadas de hidrocarburos en el lecho marino, una columna de hidrocarburos que se levanta desde una fuga submarina o una capa de hidrocarburos en la costa.

Es una característica del entorno marino que muchas especies tienden a agruparse en las interfaces físicas, entre la tierra y el mar (líneas costeras), el aire y el agua (la superficie del mar) o donde el hielo se encuentra con el agua. Los hidrocarburos también tienden a concentrarse en esas interfaces. Si el hidrocarburo llega a la costa, otros factores medioambientales también serán importantes como, por ejemplo, la acción del oleaje, la pendiente, el tipo de sustrato y la presencia de peculiaridades que entrapen el hidrocarburo. Su influencia en la persistencia del hidrocarburo en la costa será una de las consideraciones más importantes para los impactos a largo plazo. Estos se describen en mayor detalle en IPIECA-IOGP, 2015a.

Además de estos factores medioambientales, muchos factores ecológicos y biológicos también influyen en la sensibilidad, la capacidad de resistencia y de recuperación de las especies individuales. Muchos de estos pueden tener efectos consecuentes sobre las comunidades y los ecosistemas. Se brindan ejemplos en la sección sobre los *Impactos de los derrames de hidrocarburos sobre la vida marina y la fauna relacionada* en las páginas 20-38.

Estacionalidad

La mayoría de las especies atraviesan etapas estacionales con respecto a su comportamiento o biología (por ejemplo, la migración, el apareamiento y el desove), especialmente en las regiones templadas y polares. Estas diferentes etapas pueden afectar en gran medida cuán vulnerables son ante un derrame de hidrocarburos. La estacionalidad a menudo causa que una especie o una etapa de vida determinada se presente o se concentre en un área o hábitat en particular en un momento determinado del año. Como los huevos y los juveniles tienden a ser más sensibles que los adultos (en parte debido a que tienen una mayor relación superficie-volumen), las concentraciones estacionales podrían ser vulnerables a los derrames.



©Michael I-Haferkamp, 2002
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:AlcaArctica_2.jpg

Abajo: los álcidos, como la mayoría de las aves árticas, son altamente estacionales en lo que respecta a su biología y comportamiento. Migran hacia el norte hasta el Ártico superior en la primavera para reproducirse en grandes colonias y alimentarse de pequeños crustáceos del hielo marino. En el invierno migran hacia el sur al norte del Atlántico.

Función ecológica de las especies clave

Como se mencionó en la Introducción, algunas especies juegan un papel importante en la ecología de sus comunidades. Algunas especies (por ejemplo, los manglares, las plantas de pantano y los corales) crean un hábitat del que muchas otras especies dependen. Otras especies pueden tener un papel clave como depredadores, herbívoros, carroñeros y bioturbadores (volteando los sedimentos del lecho marino). Un efecto relativamente pequeño en una de estas especies (a veces llamadas especies clave) podría tener un efecto consecuente sobre el resto de la comunidad.

Factores del estilo de vida

Existe una serie de rasgos biológicos que pueden hacer que una especie sea capaz, en mayor o menor medida, de recuperarse rápidamente de un derrame de hidrocarburos. Estos incluyen la longevidad (esperanza de vida), la estrategia reproductiva y su capacidad (especialmente el número de descendientes), el potencial de movilidad/dispersión (por ejemplo, juveniles planctónicos), la tasa de crecimiento, el método de alimentación y la distribución geográfica. Por lo tanto, si un derrame impacta sobre una población de una especie de larga vida, de crecimiento lento, con muy pocas crías por año y limitada a un área pequeña, su recuperación podría ser lenta incluso en caso de un impacto modesto. Por otro lado, una población de una especie con los rasgos opuestos probablemente se recupere rápidamente, incluso si un gran número muere debido a los hidrocarburos. Ese tipo de especies son llamadas resistentes. Algunas especies con estos rasgos podrían ser oportunistas, aprovechando las condiciones de desventaja de especies menos resistentes y podrían colonizar rápidamente y dominar el hábitat. De hecho, el notable incremento de estas especies es una indicación común de que se ha producido un impacto. A medida que la contaminación se reduce y las especies impactadas vuelven a colonizar, la comunidad recuperará gradualmente su equilibrio natural, a veces mediante una serie de etapas de sucesión. Ejemplos de especies oportunistas (que se analizan más a detalle en la siguiente sección) incluyen algas verdes efímeras en las costas rocosas y algunas especies de gusanos poliquetos en las comunidades de los sedimentos.

Salud y estado

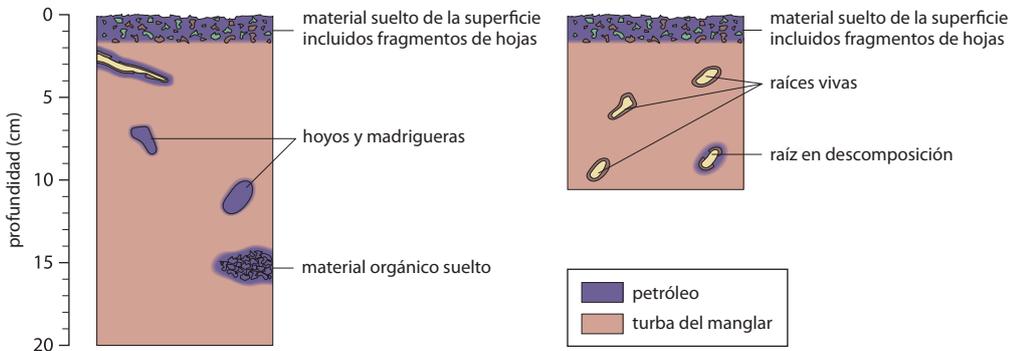
Los organismos individuales, las poblaciones e incluso las comunidades y los ecosistemas que ya se encuentran bajo tensión por otra causa pueden verse afectados con especial dureza por un derrame de hidrocarburos. A esto se le conoce como el concepto del "impacto acumulativo". Las aves marinas migratorias, por ejemplo, serán más sensibles a los efectos de los hidrocarburos si aún no se han recuperado de las severas condiciones meteorológicas durante su viaje. Múltiples derrames de hidrocarburos en el mismo lugar también pueden reducir progresivamente la condición y resistencia de las comunidades y el ecosistema, lo que resulta en impactos a largo plazo.

Además de lo anterior, algunas especies son simplemente más resistentes a los impactos de la contaminación por hidrocarburos que otras, como parte de una función de su anatomía, fisiología, comportamiento y otros aspectos de su compleja biología individual. Ver la sección en las páginas 20-38 para obtener ejemplos.

Impactos a largo plazo y recuperación

A pesar de la existencia de impactos de múltiples derrames en el mismo lugar (como se señala en *Salud y estado*, línea atrás), la mayoría de los derrames de hidrocarburos son pequeñas emisiones de consecuencia limitada. Además, para la mayoría de los derrames de hidrocarburos significativos, los impactos ecológicos son limitados en magnitud y duración, con pocos efectos detectables que duran más de uno o dos años. Incluso en el caso de grandes derrames, la mayoría de los hábitats y poblaciones marinas expuestas al hidrocarburo se recuperan rápidamente, y cualquier impacto a mayor plazo normalmente está confinado a áreas relativamente pequeñas. En los lugares donde se han descrito efectos a largo plazo, la causa principal es el hidrocarburo persistente, por lo general en forma de residuos pesados o incorporado a sedimentos fangosos, y más a menudo en hábitats que están protegidos del movimiento del agua. En los lugares donde el hidrocarburo no es persistente; es decir, en la mayoría de las otras zonas afectadas por el derrame, la recuperación suele ser rápida y solo está limitada por la velocidad de los procesos naturales. Otras causas de los posibles efectos a largo plazo incluyen una respuesta intrusiva excesiva (por ejemplo, daño físico al hábitat por las actividades de limpieza), la mortalidad importante de una especie de vida larga (es decir, especies que requieren de largos periodos de tiempo para reproducirse y regresar a los niveles de población previos al derrame) y otros factores que dan como resultado una repoblación lenta de la población afectada (por ejemplo, poblaciones geográficamente aisladas). En la siguiente sección se proporcionan ejemplos de cada uno de estos casos.

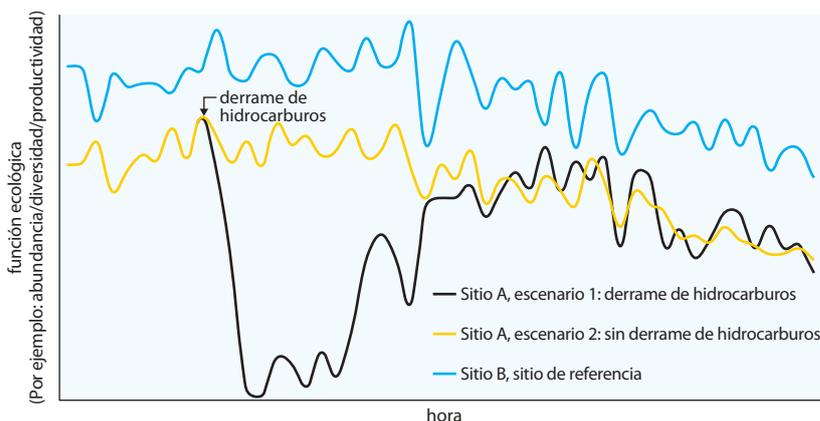
Figura 3 Dos muestras principales tomadas de un manglar después del derrame de una refinería en Panamá en 1986



El petróleo del derrame de una refinería en Panamá impactó en los manglares y penetró los sedimentos. Esta contaminación persistente se convirtió en una fuente crónica de hidrocarburos que posteriormente afectó un arrecife de coral vecino durante algunos años.

Cualquiera que sea la magnitud o extensión del impacto, la recuperación natural, finalmente, se llevará a cabo, aunque existe un continuo debate acerca de cuánto tiempo tarda dicho proceso en muchas situaciones. Reconocer las primeras etapas de recuperación suele ser sencillo, pero las últimas etapas a menudo son difíciles de describir con precisión. En la mayoría de los casos es difícil establecer el momento en que se ha completado la recuperación y los científicos suelen ser conservadores en sus análisis. Un desafío importante yace en que no existe una definición ampliamente aceptada de *recuperación* o *recuperado*. Tradicionalmente, y en gran medida aún hoy en día, las poblaciones y comunidades han sido descritas en términos de la abundancia y/o la biomasa de cada especie reconocible. Por lo tanto, la lógica sugiere que la *recuperación* se puede describir simplemente como el retorno a los niveles de abundancia o biomasa pre-existentes para cada especie. Sin embargo, es un hecho reconocido que los recursos biológicos y muchos de los factores medioambientales que caracterizan los hábitats biológicos están en un estado continuo, y en gran medida impredecible, de cambio constante. Por esta razón, no necesariamente puede esperarse que un recurso dañado regrese exactamente a como era antes del derrame; del mismo modo, no es posible predecir con exactitud cómo habría sido el recurso en cuestión si no hubiera sido dañado por el derrame. Las definiciones actuales de recuperación a menudo se refieren a la función ecológica y/o a la función del ecosistema proporcionada por la especie/población/comunidad para el entorno en general. Dos de esas funciones que son ampliamente reconocidos como importantes para las comunidades y los ecosistemas son la biodiversidad (la variedad de la vida) y la productividad (la cantidad de materia biológica creada por unidad de tiempo).

Figura 4 Ejemplo de fluctuaciones naturales en la función ecológica en dos sitios vecinos y los posibles impactos de un derrame de hidrocarburos, con una recuperación posterior, en uno de ellos



Los sitios A y B tienen diferentes características medioambientales, por lo que las mediciones de la función ecológica no pueden compararse directamente en cualquier punto particular en el tiempo; sin embargo, la tendencia general en cuanto a la función es similar, lo que permite cierto nivel de valoración de la recuperación.

Impactos de los derrames de hidrocarburos sobre la vida marina y la fauna relacionada

Plancton

El plancton incluye microbios (bacterias, etc.), fitoplancton (pequeñas algas que a menudo son unicelulares) y zooplancton (en su mayoría pequeños crustáceos, pero también medusas y otros animales), además de esporas, huevos y larvas de otras plantas y animales (algas, invertebrados y peces). Las densidades del plancton son mayores en las aguas costeras donde las concentraciones de nutrientes son suficientemente altas como para sostenerlas y estar cerca de las poblaciones adultas. Esta gran biomasa difusa es la base de la mayor parte de las cadenas alimentarias marinas.

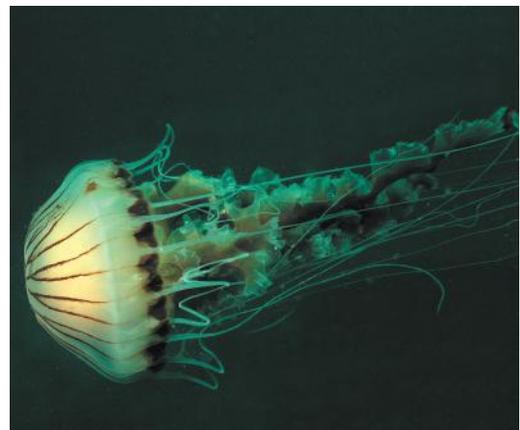
Los organismos planctónicos son relativamente sensibles a los efectos tóxicos de la exposición a los hidrocarburos, en particular a las fracciones solubles en agua y a las pequeñas gotas de hidrocarburo, y los estudios de laboratorio han descrito una amplia gama de efectos agudos, crónicos y subletales sobre varias especies y etapas de vida. Sin embargo, la mayoría de los estudios de las comunidades naturales de plancton en el mar han encontrado un rápido retorno a las densidades normales y a la composición de la comunidad una vez que el hidrocarburo en las concentraciones de agua ha regresado a sus niveles básicos. Su capacidad para recuperarse tan rápidamente se debe a tiempos cortos de generación, la producción de grandes cantidades de huevos y juveniles, la distribución en grandes áreas y el intercambio rápido del agua. Pocos estudios han descrito los efectos sobre las densidades de especies planctónicas durante más de unos pocos días o semanas. Por ejemplo, los estudios posteriores al hundimiento del buque tanque soviético *Tsesis* en 1977, durante el que se liberaron 1000 toneladas de combustóleo de grado medio en el mar Báltico, mostraron que la biomasa de zooplancton se redujo sustancialmente cerca de los restos del naufragio durante los primeros días después del derrame, pero volvió a la normalidad al cabo de cinco días. La contaminación del zooplancton por hidrocarburos se registró durante más de tres semanas y se sugería que el aumento a corto plazo en la biomasa de fitoplancton y en la producción primaria en la zona afectada se debió a la disminución de las tasas de cosecha de zooplancton.

Las preocupaciones potenciales por determinadas especies y etapas de vida vulnerables permanecieron sin cambios. Algunas especies de peces tienen poblaciones genéticamente aisladas que desovan en lugares particulares y que tienen huevos o larvas planctónicas que podrían ser vulnerables. Si un derrame importante se produjo en la misma zona y, al mismo tiempo del desove o del desarrollo posdesove, es posible que haya una mortalidad significativa entre los huevos o las larvas. Teniendo en cuenta el gran número de huevos producidos por la mayoría de los peces y la pequeña proporción que necesitaban sobrevivir para mantener las poblaciones adultas, sigue siendo poco probable que un derrame tenga un impacto detectable en la población de peces. Un ejemplo reciente de este tipo de preocupación involucró al atún rojo del Atlántico

El plancton varía en tamaño. Aquellos cerca de la superficie son vulnerables y sensibles a concentraciones elevadas de hidrocarburos debajo de una mancha de hidrocarburo. Sin embargo, en la mayor parte de los derrames en mar abierto, la exposición del plancton es de corto plazo y la recuperación es rápida.



Imágenes Wellcome



oeste en el Golfo de México; esta especie es conocida por desovar en un área que se superpone parcialmente con el área de mar afectada por el petróleo derramado por la explosión del pozo Macondo en 2010, y por poner huevos que flotan en la superficie. Estudios de laboratorio en Australia han demostrado que los hidrocarburos pueden afectar el desarrollo de los embriones de atún rojo del sur, proporcionando un posible mecanismo para los efectos. Sin embargo, los resultados publicados de estudios de campo que investigan el atún rojo del Atlántico en el Golfo de México no presentan ninguna evidencia de efectos.

Vida en los lechos marinos

Los sedimentos, con variadas mezclas de barro, arena y grava, conforman la mayor parte de los hábitats del lecho marino en las zonas de alta mar, mientras que la roca madre y los peñascos son más comunes cerca de la costa. La diversidad de hábitats es tan grande como la que se puede encontrar en tierra. Algunos hábitats están dominados, o incluso conformados, por especies o grupos de especies, por ejemplo, bosques de algas, lechos de algas marinas, bancos de mejillones y arrecifes de coral. Las algas y los pastos marinos únicamente se encuentran en aguas relativamente poco profundas, donde hay suficiente luz (es decir, como máximo a unas pocas decenas de metros), pero las comunidades de animales se extienden hacia todas las profundidades.

La vulnerabilidad de las comunidades del lecho marino respecto del petróleo producto de derrames en la superficie depende principalmente de la profundidad del agua, ya que las concentraciones ecológicamente significativas de hidrocarburos disueltos o dispersados a partir de mareas negras superficiales raramente llegan debajo de los 10 metros. Por otra parte, no es habitual que las altas concentraciones permanezcan durante mucho tiempo sobre alguna mancha particular en el lecho marino. Conforme la mancha de hidrocarburo se mueve y envejece con el paso del tiempo, la posibilidad de que las concentraciones de hidrocarburos puedan tener efectos tóxicos que alcancen incluso los fondos marinos poco profundos disminuye aún más. Por ejemplo, durante la Guerra del Golfo de 1991, el petróleo derramado al norte del Golfo Pérsico se movió con dirección sur hacia las aguas de Arabia Saudita y pasó directamente sobre arrecifes de coral poco profundos, sin efectos detectables.

Las explosiones submarinas podrían tener un mayor potencial de impactos sobre el lecho marino en aguas profundas, dependiendo de las circunstancias. Durante el derrame de hidrocarburos del pozo Macondo en el Golfo de México se aplicaron dispersantes químicos en el cabezal del pozo para mejorar la dispersión y aumentar la biodegradación del hidrocarburo. Los estudios han demostrado que las corrientes de aguas profundas transportan gotas del hidrocarburo dispersadas por encima del lecho marino durante muchos

Los bosques de algas y los lechos de algas marinas también crecen en aguas poco profundas y se caracterizan por una alta biodiversidad y productividad. Las plantas no son particularmente sensibles a concentraciones elevadas de hidrocarburos, pero muchos de los animales que viven en estos hábitats sí lo son, incluidos los juveniles.





Los hábitats del lecho marino a profundidades por debajo de los 10 a 20 metros tienen poca o ninguna vulnerabilidad a los hidrocarburos dispersados a partir de derrames en la superficie.

También es posible encontrar una gran diversidad de vida marina en las aguas profundas. Esta no es vulnerable a los derrames en la superficie, pero existe la posibilidad de una exposición a los hidrocarburos en el caso de los derrames debajo de la superficie.

kilómetros. Sin embargo, las concentraciones de hidrocarburos eran bajas; un monitoreo exhaustivo de la columna submarina encontró niveles de hidrocarburos volátiles en un máximo de 1,2 ppm (partes por millón) a poco más de 1 km de distancia de la boca del pozo, y niveles de < 0,1 ppm a distancias superiores a los 20 km. Las cifras equivalentes para compuestos semivolátiles (compuestos orgánicos que pueden evaporarse a temperatura ambiente, aunque solo lentamente) fueron < 0,5 ppm con máximo y < 0,01 ppm a distancias superiores a los 10 km. Las comunidades de peces y del lecho marino, por tanto, podrían haber estado expuestas a concentraciones elevadas, pero existe poca evidencia de que el hidrocarburo dispersado haya contaminado los sedimentos del lecho marino. Los estudios de laboratorio y las evidencias empíricas indican que, de no haberse utilizado dispersantes, la mayor parte del hidrocarburo habría subido a la superficie y la exposición del lecho marino se habría reducido, pero los impactos sobre los recursos de la superficie y de la costa hubieran sido mayores. Un análisis de beneficio ambiental neto (ver la sección titulada *Manejo del impacto potencial y de la respuesta ante derrames de hidrocarburos* en las páginas 39-43) llegó a la conclusión de que las compensaciones eran apropiadas, aunque esta no es una opinión universalmente aceptada. Otras circunstancias que puedan dar lugar a la contaminación del lecho marino en aguas profundas incluyen los derrames de hidrocarburos de alta densidad que han envejecido y hundido, como se describe en las páginas 12-13.

En el caso poco probable de que la elevación de las concentraciones de hidrocarburos en el agua no alcance el lecho marino, cualquier organismo que esté directamente expuesto a la columna de agua será vulnerable, esto incluye a las plantas y los animales que viven en la superficie del lecho marino, a los que se conocen colectivamente como *epibiota*, y cualquier animal de madriguera que arrastre el agua hacia sus madrigueras o con tejidos para la alimentación o irrigación. La mayoría de los otros animales que viven en el sedimento estarán parcialmente protegidos a menos que el hidrocarburo se incorpore de manera significativa al sedimento, lo que solo ocurre bajo determinadas circunstancias (ver *Sedimentación* en la página 12).



NOAA/MBARI

La epibiota en el lecho marino en aguas poco profundas podría ser vulnerable a concentraciones de hidrocarburos cerca del fondo, aunque buena parte de la misma será relativamente insensible incluso a altas concentraciones debido a que la duración de la exposición normalmente es corta. Los efectos de los hidrocarburos sobre las macroalgas, tales como las algas marinas y muchas otras especies que dominan sustratos duros en aguas poco profundas son pequeños debido a su recubrimiento mucilaginoso que resiste la absorción de los hidrocarburos. Muchos invertebrados sésiles, incluso algunos que se alimentan por filtración o capturan partículas de la columna de agua y que por lo tanto absorben las gotas de hidrocarburo más fácilmente, como las esponjas y las ascidias, también sobrevivirán aparentemente no afectados por las altas concentraciones.

Es posible que estos animales se vean temporalmente afectados por una alta dosis corta de hidrocarburos (como se mencionó en la sección sobre *Impactos ecológicos y recuperación*, en las páginas 15-19), pero no mueran. Los mejillones son otro ejemplo: absorben fácilmente los hidrocarburos de la columna de agua y lo acumulan en sus tejidos, pero son resistentes a sus efectos tóxicos. Se ha descrito una serie de efectos subletales sobre su crecimiento, reproducción y otros efectos en los tejidos, pero una vez que el hidrocarburo ha desaparecido y que sus tejidos se han limpiado (mediante un proceso denominado depuración, que puede tardar meses) por lo general sobreviven bien, sin efectos detectables sobre sus poblaciones.

Sin embargo, algunos grupos de animales del lecho marino son sensibles incluso a breves exposiciones de concentraciones relativamente bajas de hidrocarburos en el agua, incluyendo a los bivalvos de madriguera y a los crustáceos pequeños llamados anfípodos.

Algunos bivalvos que se alimentan por filtración y que viven en los sedimentos cercanos a la costa reaccionarán a una dosis de hidrocarburo en el agua expulsándose a sí mismos del sedimento. Después de algunos derrames costeros, un gran número de bivalvos afectados, como por ejemplo, navajas y berberechos, fueron arrojados a las costas para luego concentrarse a lo largo de la franja costera. Algunos bivalvos pueden vivir por muchos años o décadas, y si una proporción notable de su población se ha perdido, puede pasar un buen tiempo para que puedan recuperarse. Otros animales que viven en sedimentos y que arrastran el agua hacia sus madrigueras han sido encontrados varados en las playas después de derrames de hidrocarburos. Entre estos se incluyen los erizos de mar y los cangrejos.



Algunos anfípodos (dentro de los cuales existe un gran número de especies, adaptadas a una gran variedad de hábitats) también se alimentan por filtración, y muchos estudios han informado impactos sobre sus poblaciones relacionados con derrames. Algunos anfípodos a menudo se utilizan como organismos de prueba en estudios de toxicidad de los sedimentos, ya que se ha descubierto que son buenos indicadores de la contaminación. Los anfípodos de aguas poco profundas en zonas templadas y tropicales por lo general tienen una vida corta y múltiples generaciones por año, por lo que la recuperación de sus poblaciones es generalmente rápida. Sin embargo, durante el derrame de hidrocarburos del *Amoco Cádiz* en 1978 hubo una caída dramática relativamente localizada en las previamente altas densidades de un anfípodo que habita en tubos (*Ampelisca*), y un cambio subsecuente en el resto de la comunidad. Pasaron 15 años para que las altas densidades de anfípodos regresaran, y para que se alcanzara una estructura de comunidad similar a la que estaba presente antes del derrame.

Se han reportado impactos en las poblaciones de anfípodos y bivalvos de madriguera cercanas a la costa después de muchos derrames costeros, pero a menudo se han producido algunos otros efectos detectables en las comunidades del lecho marino. Hasta cierto punto esto podría deberse a las dificultades logísticas del muestreo y mantenimiento de los datos previos al derrame para la comparación, pero esto no fue lo que sucedió en el caso del derrame del *Sea Empress* en 1996 en el suroeste de Gales, Reino Unido, donde hubo una serie de programas de vigilancia en curso durante muchos años. Aproximadamente la mitad de las 72.000 toneladas del hidrocarburo crudo derramado se dispersó de forma natural y química, y los estudios de los fondos marinos mostraron reducciones marcadas en las densidades de los pequeños crustáceos (anfípodos y cumáceos) en las proximidades de los restos del naufragio, pero no otros efectos notables sobre

Un gran número de berberechos, almejas y otros animales de madriguera se expulsaron a sí mismos de los sedimentos submareales poco profundos después de la exposición a concentraciones elevadas de hidrocarburos en el agua durante el derrame del Sea Empress en 1996. Algunos quedaron varados en las playas cercanas.

Grandes números de formas de vida marina que habitan en aguas poco profundas murieron debido al gasóleo de calefacción dispersado naturalmente luego del derrame del North Cape en 1996.

las comunidades del lecho marino. Los estudios de monitoreo mostraron un patrón claro de recuperación de los anfipodos durante un período de cinco años, con densidades similares a los niveles previos al derrame para el año 2000. Un gran número de bivalvos y erizos marinos fueron varados en algunas playas, pero los estudios posteriores al derrame encontraron grandes poblaciones remanentes. No hubo evidencia de contaminación persistente de petróleo crudo, pero los estudios forenses recientes de los sedimentos del lecho marino en Milford Haven han encontrado concentraciones detectables de combustóleo pesado que también se derramó del buque tanque. Hasta la fecha no se han realizado estudios para evaluar si estas concentraciones tienen algún tipo de toxicidad crónica.



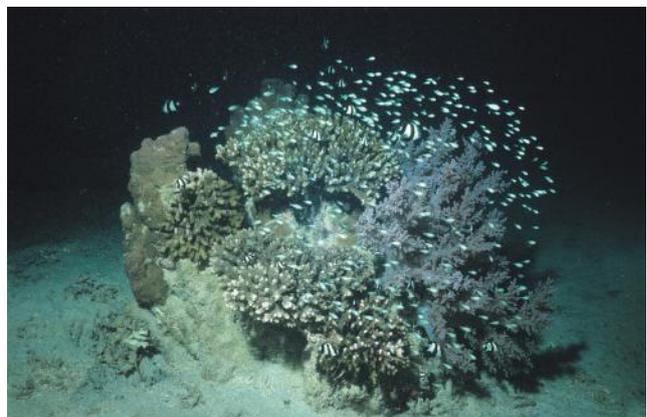
Dr. Erich Gundlach, E-Tech

Han ocurrido impactos notables por las concentraciones de hidrocarburos en el agua en otros organismos del lecho marino debido a algunos derrames, donde la combinación de la dosis y la duración ha sido suficiente para provocar mortalidades. Un ejemplo de esto ocurrió en 1996, cuando la barcaza tanque *North Cape* encalló en la costa de Rhode Island, EE. UU., liberando aproximadamente 3100 metros cúbicos de gasóleo de calefacción, un producto relativamente ligero. Un gran número de langostas, almejas y otras especies juveniles murieron debido a la exposición a altas concentraciones del hidrocarburo dispersado de forma natural. La mayor parte de los impactos se produjeron en zonas cercanas a la costa a no más de unos pocos metros de profundidad. Las langostas adultas no se vieron afectados significativamente, ya que se encontraban migrando hacia aguas más profundas para el invierno cuando ocurrió el derrame; por lo que se esperaba que el suministro de

larvas de langosta para la recuperación de la población tampoco se vería afectada. Sin embargo, con casi tres millones de langostas juveniles varadas en la costa, casi una quinta parte de la población de más de dos años y hasta un máximo de siete años, se estima que la recuperación tardaría varios años. Se llevó a cabo un programa de repoblación, pero los estudios mostraron que la recuperación no se produjo tan bien como se esperaba debido a la explotación intensiva de la pesca y otros impactos. También se espera que la recuperación de las almejas tomara varios años y se llevó a cabo un programa de restauración para diversas especies.

Los arrecifes de coral tropicales pueden formar extensas áreas de alta biodiversidad en aguas poco profundas, donde pueden ser a la vez vulnerables y sensibles a los derrames de hidrocarburos.

Los arrecifes de coral tropicales también se han visto afectados por los derrames de hidrocarburos, y los efectos a mayor plazo han tenido lugar allí donde ha habido mortalidad de los propios corales. Sin embargo, la sensibilidad varía entre las especies de coral y, nuevamente, la mayoría parece no ser muy sensibles a las elevaciones a corto plazo en las concentraciones de hidrocarburos. Es poco probable que los arrecifes a una profundidad mayor de 10 metros reciban la exposición a los hidrocarburos a partir de un derrame en la superficie que cause impactos significativos. A veces, otros invertebrados que viven en el arrecife se ven más afectados que el coral, y algunas veces no hay impactos registrados. Uno de los derrames tropicales mejor



estudiados se produjo en una refinería en Panamá en 1986, donde 38.000 toneladas de petróleo crudo mediano se derramaron de un tanque de almacenamiento roto impactando los arrecifes de coral de aguas intermareales y de poca profundidad. Esto causó un daño sustancial a los corales, a profundidades de alrededor de seis metros, y la recuperación fue lenta debido a los daños crónicos de los sedimentos gravemente impregnados de hidrocarburos en un manglar cercano.

En el estudio TROPICS de 1984, se llevó a cabo un experimento de campo a gran escala para comparar los efectos de los hidrocarburos dispersados químicamente con los de los hidrocarburos no dispersados. Los resultados mostraron disminuciones en el corto plazo (un año) en la cobertura de coral y en otros invertebrados de coral y peces territoriales en el sitio del hidrocarburo dispersado. También hubo reducciones menores en la cobertura de coral en el corto plazo en el sitio del hidrocarburo no dispersado, pero la cobertura luego se incrementó en ambos sitios. Este contraste con los impactos mucho más evidente y de largo plazo sobre los manglares en el sitio del hidrocarburo no dispersado.

En situaciones en las que cantidades significativas de hidrocarburos se han incorporado a los sedimentos fangosos, o cuando un residuo de hidrocarburo hundido forma una capa en el lecho marino, podría persistir durante años ya que la biodegradación puede ser lenta debido a la falta de oxígeno. La toxicidad de los hidrocarburos puede afectar a la comunidad de los sedimentos, y una capa de hidrocarburo hundido también podría actuar como una barrera para la colonización. Con el tiempo, la toxicidad se reducirá mientras que el hidrocarburo envejece, aunque parte de la toxicidad podría permanecer atrapada debajo de la superficie. El caso del derrame de hidrocarburos del *Amoco Cádiz* de 1978 es el ejemplo más grave registrado. Las concentraciones de hidrocarburos en los sedimentos de arcilla de dos estuarios alcanzaron niveles altos y gusanos poliquetos oportunistas se convirtieron en los dominantes durante unos años hasta que la toxicidad de los sedimentos se redujo. También se demostró que el hidrocarburo causaba daño a los tejidos y que tenía otros efectos subletales en una especie de peces planos, que seguían siendo evidentes ocho años más tarde. Otros ejemplos, con menores concentraciones de sedimentos e impactos menos graves, incluyen lechos de algas marinas de aguas poco profundas afectadas por el derrame del *Exxon Valdez* en 1989, y los sedimentos relativamente profundos (30 metros) afectados por el derrame del *Tsesis* 1977 en el Mar Báltico. Ejemplos de los impactos de los hidrocarburos hundidos incluyen el derrame del *Haven* de 1991 en Génova, Italia, donde grandes cantidades de residuos quemados de explosiones e incendios en la embarcación se asentaron en el lecho marino y formaron una capa dura que luego fue parcialmente colonizada por la epibiota. Los estudios también encontraron algunas pruebas de efectos tóxicos subletales en los tejidos de los peces planos en la muestra de la zona. Este no es, sin embargo, un ejemplo representativo del impacto de los residuos que quedan después de la quema controlada in situ de los hidrocarburos derramados, donde el hidrocarburo flotante es contenido y quemado en un área mucho más amplia que resulta en bajas concentraciones de residuos dispersados que podrían llegar a los sedimentos en el fondo.

Las comunidades de los fondos marinos en los mares polares tienen algunas diferencias notables respecto de aquellas en los mares más cálidos, ya que una mayor proporción de especies son de vida larga y de crecimiento lento. La falta de estudios de casos significa que es difícil realizar predicciones seguras sobre los impactos de los hidrocarburos que llegan a esos hábitats, pero los estudios de las comunidades de sedimentos del fondo marino durante el experimento de derrame de hidrocarburos en la isla de Baffin (ver la página 42) encontraron efectos muy limitados tanto del hidrocarburo dispersado como no dispersado, sin efectos detectables luego de pasados dos años en el sitio más afectado. Algunos autores sugieren que las comunidades de los lechos marinos en los mares polares podrían ser más sensibles a los hidrocarburos que aquellas en climas templados; sin embargo, de haber un impacto, la recuperación podría ser prolongada debido a los procesos ecológicos más lentos. Un estudio del derrame de diésel del *Nella Dan* de 1987 en el sector australiano de la Antártida indicó que este impacto dio lugar a altas tasas de mortalidad en las comunidades de invertebrados de hábitats intermareales y submareales rocosos poco profundos. Las comunidades intermareales se recuperaron rápidamente, pero las comunidades de animales que viven dentro de bolsones de algas mostraron algunos efectos a más largo plazo. Siete años después del derrame, la estructura de la comunidad del bolsón en las muestras de los sitios fuertemente impregnados de hidrocarburos mostró niveles moderados de recuperación, incluidas las poblaciones de especies sensibles.

Del mismo modo, las comunidades del lecho marino en aguas profundas también se caracterizan por especies de larga vida, y podrían necesitar de mucho tiempo para recuperarse de los impactos de un derrame. Los estudios realizados en el Golfo de México luego del impacto del pozo Macondo de 2010 en las áreas identificadas con contaminación de los sedimentos en las proximidades de la boca del pozo durante el primer año después del evento, junto con una reducción en la diversidad de las comunidades de sedimentos en aquellas áreas durante ese momento y un pequeño número de corales de agua fría en mal estado. Sin embargo, la mayoría de los corales de agua fría pareció no estar afectada por el impacto, y la evidencia actualmente es demasiado limitada para sacar conclusiones firmes acerca de los efectos a largo plazo del derrame o para extraer conclusiones generales acerca de los impactos de las emisiones submarinas en el lecho marino.

Peces y fauna piscícola

El énfasis de esta sección está en los peces de aleta, pero también se discutirá sobre algunos de los crustáceos y moluscos que son componentes habituales de la pesca de captura. La mayoría de los crustáceos y moluscos son importantes dentro de las comunidades del lecho marino, y se han abordado anteriormente. Relativamente pocas especies de peces contribuyen a las capturas de la pesca comercial, pero todas ellas desempeñan un papel en una o más cadenas alimentarias de los ecosistemas. La mayoría, aunque no todas, pueden ubicarse en una de las tres agrupaciones ecológicas: peces pelágicos, demersales o bentónicos:

- Los peces *pelágicos*, que incluyen las anchoas, arenque, atún y calamar, viven en aguas abiertas, por lo general se alimentan de plancton y de otros peces pequeños, y tienden a ser muy móviles. Muchos son migratorios, moviéndose hacia diferentes zonas durante diferentes estaciones o diferentes partes de su ciclo de vida.
- Los peces *demersales* incluyen el bacalao, la gallineta, el lábrido y muchos tiburones, pasan la mayor parte de su vida cerca del lecho marino donde encuentran la mayor parte de sus alimentos, aunque también puede moverse hacia aguas intermedias. No son tan móviles como las especies pelágicas, y mientras que algunos son migratorios, la mayoría pasa largos períodos en el mismo lugar.
- Los peces *bentónicos* incluyen a todos los peces planos, bagre, perlón y la mayoría de los crustáceos, viven en el fondo del mar, rara vez nadan hacia la parte de arriba del agua. Por lo general, son mucho menos activos que los peces pelágicos y los demersales, y muchos tienen fuertes lazos de comportamiento con un lugar en concreto.

Otras agrupaciones ecológicas útiles son los peces anádromos y catádromos, incluido el salmón, el esturión y la anguila, que migran hacia el agua dulce o hacia el mar, respectivamente, para desovar. Estas agrupaciones son relevantes cuando se toma en consideración la vulnerabilidad a las diferentes situaciones de derrame de hidrocarburos.



Como se ha descrito anteriormente respecto a las formas de vida de los lechos marinos, la probabilidad de que un pez o un marisco resulten expuestos a hidrocarburos solubles en agua o a gotas de hidrocarburo dispersadas, producto de un derrame de hidrocarburos en la superficie depende en gran medida de la profundidad del agua en la que viven. Es por esta razón por la que muchos países normalmente solo permiten la aspersión de dispersantes químicos sobre una mancha de hidrocarburo superficial en aguas de profundidad mayor a 10 a 20 metros sin la necesidad de un estudio detallado de los recursos marinos específicos. La lógica detrás de esto es que es poco probable que el aumento de la dispersión del hidrocarburo en aguas profundas afecte a las poblaciones de peces u otros recursos importantes en esas zonas; por ejemplo, las especies bentónicas y demersales estarán por debajo de las profundidades a las que normalmente llegan las concentraciones elevadas de hidrocarburos, mientras que los peces pelágicos evitan las aguas superficiales para reducir el riesgo de depredación por parte de las aves, y son tan móviles que tienen pocas probabilidades de estar expuestos a altas concentraciones de hidrocarburos durante largos períodos de tiempo. Además, existe evidencia, a partir de los estudios de migraciones de salmón contaminado y experimentos de laboratorio, de que los peces pueden detectar (mediante receptores del gusto sensibles en la línea lateral a lo largo de sus flancos), y evitarán, el agua contaminada con hidrocarburos; sin embargo, también hay cierta evidencia de que otros estímulos podrían anular dichos patrones de evitación. Cualquiera que sean las razones, es evidente que la probabilidad de una mortalidad de los peces producto de derrames de hidrocarburos en aguas abiertas es pequeña, así se usen dispersantes químicos o no; no hay registros publicados de muertes significativas de peces en las zonas de alta mar y muy pocos de zonas costeras abiertas.

Como se analizó en la sección sobre la vida en los lechos marinos (páginas 21-26), reventones submarinos pueden provocar que los peces de aguas profundas queden expuestos a concentraciones de hidrocarburos, pero el potencial de los efectos tóxicos no se conoce. Se sabe muy poco acerca de la biología de los peces de aguas profundas y su respuesta a la contaminación por hidrocarburos. El monitoreo durante el derrame en aguas profundas del Macondo en 2010 mostró una columna de dilución submarina a unos 300 metros por encima del lecho marino, con concentraciones de hidrocarburos cayendo a alrededor de 1 ppm a poco más de 1 km desde la boca del pozo y < 0,1 ppm a 20 km, aunque estos niveles se mantuvieron mientras el derrame continuó. Los datos sobre los efectos de los derrames de hidrocarburos en el Ártico sobre los peces son demasiado limitados como para proporcionar mucha información sobre la vulnerabilidad relativa y el potencial de recuperación. Los estudios toxicológicos indican que las especies del Ártico requieren un período de tiempo más largo para exhibir efectos asociados con las exposiciones a los hidrocarburos pero que su sensibilidad es similar a las especies de climas templados.

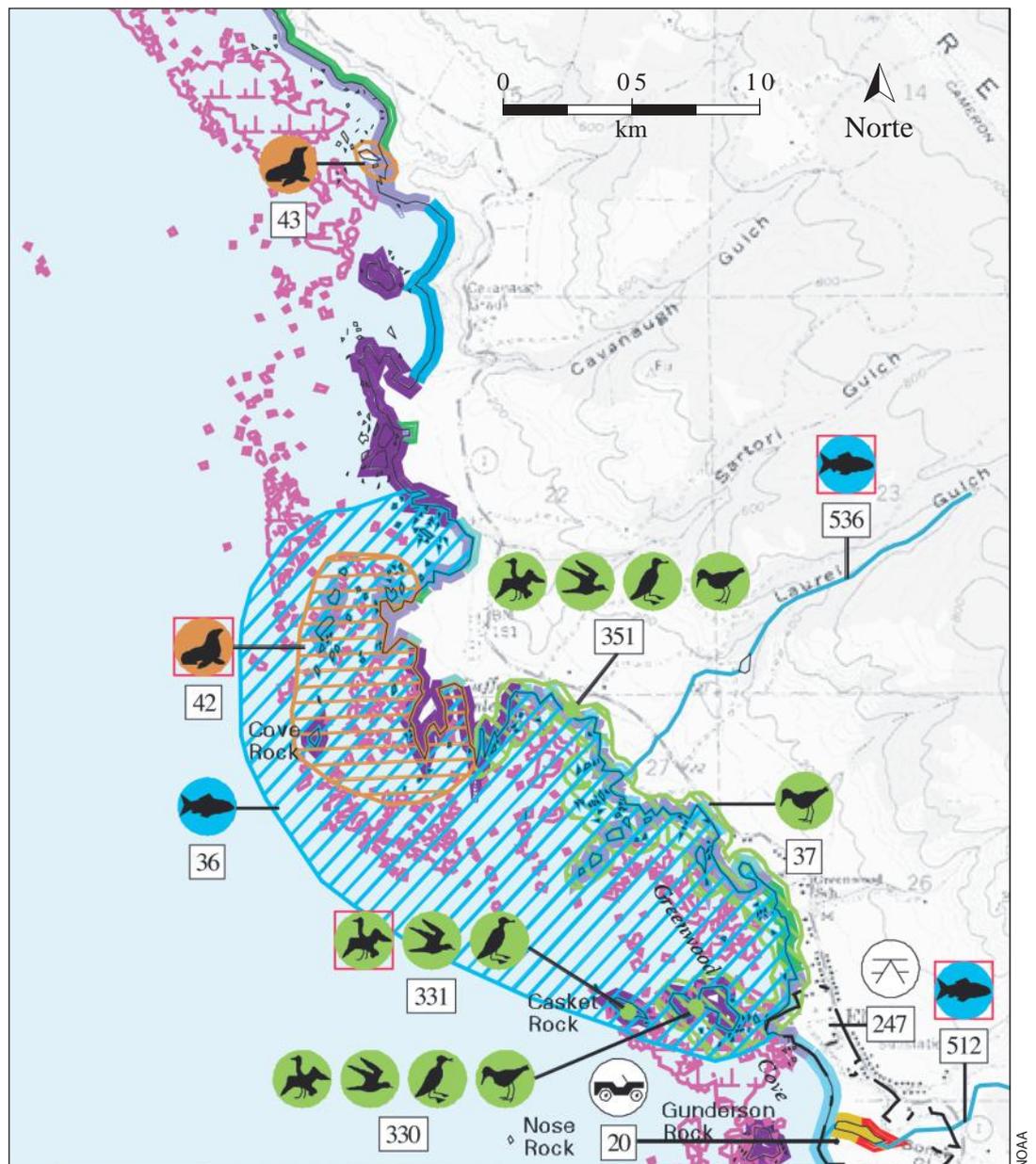
El riesgo de exposición se incrementa si se produce un derrame en aguas poco profundas y en cualquier otra situación en la que la tasa de dilución de las concentraciones de hidrocarburos pueda ser limitada; por ejemplo, en lagunas, estuarios y bahías. Otros factores que se describen en la sección sobre el destino de los hidrocarburos (páginas 9-14), también afectarán las concentraciones disponibles de hidrocarburo disuelto y dispersado. Muchas especies de peces demersales y bentónicas están adaptadas a vivir en hábitats de aguas poco profundas, mientras que muchas otras se trasladan hacia aguas poco profundas para reproducirse y/o desovar. Algunas especies son territoriales, sobre todo en la época de apareamiento, y es poco probable que se alejen aun si pudieran hacerlo. Algunas especies migratorias pasarán a través de los hábitats costeros poco profundos en grandes cantidades y en momentos concretos del año, haciéndolas mucho más vulnerables a un derrame si coincide con esas fechas. Los estadios juveniles de muchos peces, incluyendo muchas especies comerciales, se concentran en hábitats de aguas poco profundas como lechos de algas marinas, bosques de algas marinas y manglares donde la comida es abundante y pueden esconderse de los depredadores. Estas zonas de cría a menudo se destacan en los mapas de sensibilidad ante derrames de hidrocarburos para ayudar en su protección por parte de los tomadores de decisiones durante las acciones de respuesta. Las pruebas de toxicidad en laboratorio han demostrado que los huevos, larvas y juveniles de los peces, como en el caso de otros animales, son generalmente mucho más sensibles a los hidrocarburos que los adultos.

La mayoría de las especies de peces vive en un hábitat diferente durante cada etapa de su vida. Los juveniles de muchas especies pasan sus primeros meses en hábitats con vegetación y poca profundidad (<10 m) para evitar a los depredadores. Estas áreas serán vulnerables a los hidrocarburos en el agua a causa de un derrame en la superficie.



Un derrame costero que produzca altas concentraciones sostenidas de hidrocarburos en aguas cerca de la costa tiene, por tanto, un mayor riesgo de generar efectos tóxicos sobre las poblaciones de peces. Ese tipo de derrames han ocurrido, por ejemplo, durante el derrame de la barcaza *Florida* en Buzzards Bay, Massachusetts, en el año 1969. Este ocurrió en medio de un clima de tormenta, y ocasionó que 570 toneladas de gasóleo de calefacción N.º 2 se mezclara con aguas costeras poco profundas, así como una gran matanza de peces pequeños (no comerciales) y de invertebrados del lecho marino. La encalladura del *Amoco Cadiz* de 1978

Figura 5 Un mapa de sensibilidad medioambiental del norte de California. El área rayada en color azul es una conocida área de cría para gallinetas juveniles; para obtener más detalles, visite el sitio web de NOAA sobre los Mapas del Índice de Sensibilidad Medioambiental (ESI, por sus siglas en inglés)



en Bretaña, Francia, derramó 221.000 toneladas de crudo ligero en aguas costeras y mató a un gran número de lábridos y anguilas de arena. Estudios de la población de peces informaron que toda una generación de juveniles de solla y lenguado (ambos peces planos) se había perdido en por lo menos un área, pero no hubo evidencias de impactos posteriores sobre los recursos pesqueros. El derrame del *North Cape* de 1996, descrito en la página 24, también provocó la muerte de peces.

Ninguno de los derrames anteriores, o de hecho ninguno de los descritos en la literatura disponible, ha dado lugar a impactos comprobados sobre las poblaciones de peces silvestres comerciales. Esto no debería ser algo sorprendente; incluso en el peor escenario en el que un derrame coincida con un evento de desove geográficamente aislado, sería muy poco probable que una proporción notable de la población adulta quede expuesta a una dosis letal y sostenida de hidrocarburos. Si bien es más probable que un número considerable de huevos, larvas o juveniles mueran, la estrategia reproductiva de los peces permite este tipo de pérdidas tan elevadas, y cualquier reducción respecto al número de los adultos jóvenes sería indetectable en comparación con el nivel natural de las fluctuaciones poblacionales.

Sin embargo, la suerte del arenque del Pacífico en Alaska tras el derrame del *Exxon Valdez* en 1989 inicialmente convenció a algunas personas de que los derrames de hidrocarburos podrían tener serios impactos sobre la pesca. El arenque del Pacífico pone sus huevos en algas marinas en zonas costeras poco profundas, y algunas de estas zonas de desove fueron expuestas al derrame de petróleo del *Exxon Valdez*. Cuatro años más tarde, cuando esa generación debió haberse unido a las poblaciones de adultos, la población de arenque se derrumbó. El derrame de hidrocarburos fue considerado por muchos como la causa obvia de ese desplome. Tras muchos años de investigación posterior, se demostró inequívocamente que la causa fueron las enfermedades y la mala nutrición de la población de arenques, y que casi con total seguridad el derrame de hidrocarburos no tuvo ningún efecto significativo.

Los impactos de los derrames de hidrocarburos sobre las poblaciones locales de peces y mariscos menos móviles se han descrito en casos aislados; sin embargo, la recuperación suele ser rápida, a menos que la repoblación sea lenta, la especie tenga una vida larga, o haya una contaminación por hidrocarburos persistente y continuada. Por ejemplo, las altas concentraciones de hidrocarburos en el agua del derrame del *Braer* de 1993 dieron lugar a una pérdida completa de peces territoriales pequeños (las barbadadas y la lota) en las proximidades del lugar del naufragio, pero la recolonización comenzó después de un año. Tras el derrame de hidrocarburos de la Guerra del Golfo de 1991, las poblaciones de gambas en Arabia Saudita se redujeron drásticamente al 25% de sus niveles anteriores a la guerra, debido a una falla en el desove. El derrame fue considerado la causa probable, pero no se determinó un mecanismo para dicho problema, aunque hubo muchas teorías. El efecto fue aislado, ya que la pesquería de Kuwait tuvo relativamente buenos años en 1992 y 1993. Por el contrario, en el Golfo de México, tras el impacto del pozo Macondo en 2010, los estudios en los lechos de algas marinas costeras poco profundas no han encontrado efectos del hidrocarburo sobre la cantidad de juveniles, excepto por algunas indicaciones de que podrían haberse beneficiado del cierre de la pesquería. En este impacto, es probable que la efectividad de la respuesta submarina y en alta mar haya realizado una contribución significativa a la protección de las poblaciones de peces en las aguas costeras poco profundas.



La mortalidad del pinto se debió a concentraciones extremadamente altas de hidrocarburos en el agua cerca de los restos del naufragio durante el derrame del Braer en 1993.

Los efectos subletales de los hidrocarburos en los peces de aleta y en los mariscos se han descrito en experimentos de laboratorio y en muestras recogidas de las áreas afectadas por los derrames de hidrocarburos. Los efectos descritos experimentalmente incluyen diversos impactos sobre la reproducción (por ejemplo eclosión de los huevos, supervivencia de las larvas y anomalías en el desarrollo de las larvas), funciones fisiológicas (por ejemplo, velocidades de nado y alimentación), daños en los tejidos (por ejemplo, enfermedades de la piel y recuento de células sanguíneas), indicadores de biomarcadores de exposición y muchos otros. Sin embargo, vale la pena destacar que los estudios de laboratorio no pueden imitar con precisión las concentraciones de hidrocarburos ni la duración de la exposición que normalmente se encuentran en el campo, y que solo se ha demostrado que unos cuantos de los efectos mencionados aquí han ocurrido en el campo después de derrames reales. La evidencia bioquímica (biomarcadores) de la exposición a los hidrocarburos se ha demostrado en muchas especies después de varios derrames, pero la evidencia de daño significativo a los peces de aleta se ha limitado a la histopatología (daño tisular) en los peces planos y otras especies bentónicas que han sido expuestas crónicamente a residuos persistentes de hidrocarburos. Por ejemplo, estudios recientes de ciprinodontiformes en marismas impregnadas de hidrocarburos debido al impacto del pozo Macondo de 2010 han mostrado cierta evidencia de efectos sobre la morfología de los tejidos, aunque otro estudio no encontró diferencias en la composición de las especies, la abundancia o tamaño de los peces de marisma en sitios impregnados y no impregnados de hidrocarburos en Luisiana entre dos y tres años después del derrame.

Los impactos indirectos sobre las poblaciones de peces a través de una menor disponibilidad de alimentos es otro punto a considerar, sobre todo si la presa principal (por ejemplo, los anfípodos) de un pez o de la etapa de vida de un pez se ve seriamente afectada por un derrame. Estos impactos no han sido descritos ni detectados en el contexto de la variación natural y serían, por lo tanto, relativamente menores si es que se estuvieran produciendo.

Desde la perspectiva de la pesca, una de las mayores preocupaciones de un derrame de hidrocarburos es la contaminación potencial, en donde los hidrocarburos absorbidos por los tejidos de los peces o mariscos se pueden degustar u oler. Esta contaminación se produce con niveles muy bajos de hidrocarburos en los tejidos. Esto conduce a un sabor muy desagradable que hace que el pez no se pueda comer y por tanto, lo vuelve inapto para el mercado. Esto puede provocar pérdidas económicas para la pesca pero no afecta a las poblaciones o a la función ecológica. En los peces de aleta, los hidrocarburos normalmente son metabolizados en cuestión de días o semanas y las poblaciones vuelven a estar libres de contaminación, generalmente con tiempos más largos para los peces grasos como el salmón. En el caso de crustáceos y moluscos, que no pueden metabolizar fácilmente los hidrocarburos, el proceso es mucho más lento y la contaminación puede persistir durante meses o incluso años.

Mamíferos marinos

Los mamíferos marinos, incluidos los cetáceos (ballenas y delfines), focas, manatíes y nutrias, son animales difíciles de estudiar debido a la comprensible renuencia de los investigadores a capturarlos o hacerles algún daño en el proceso de recopilación de información. Los datos empíricos sobre los efectos de los derrames de hidrocarburos son limitados, por lo que gran parte se basa en la observación a distancia y los análisis de los cadáveres. Sin embargo, para la mayoría de los mamíferos marinos el número de cadáveres registrados razonablemente atribuibles a los impactos de los derrames de hidrocarburos ha sido pequeño. Muchos de los estudios más detallados sobre los mamíferos marinos se llevaron a cabo en Alaska luego del derrame de hidrocarburos del *Exxon Valdez* de 1989.

La exposición al hidrocarburo líquido en la superficie del mar o la costa es el riesgo principal, y los mamíferos marinos son los más vulnerables. Si un derrame de hidrocarburos ocurre en la zona donde viven, las nutrias de mar y, en menor medida, las focas son las más vulnerables. Incluso pequeñas cantidades de hidrocarburo se impregnarán rápidamente en la piel de la nutria y afectará negativamente sus propiedades de aislamiento y



La sensibilidad de la orca, los delfines y otros cetáceos a los derrames de hidrocarburos parece ser pequeña.

repelencia del agua. A medida que el animal intenta limpiarse también puede ingerir el hidrocarburo, lo que puede causarle daños en los tejidos internos. Tras el derrame del *Exxon Valdez*, se observaron al menos un millar de nutrias de mar impregnadas de hidrocarburos y se recogieron 871 cadáveres. La recuperación de la población fue complicada debido a que, como todos los mamíferos, la población regional se compone de muchas poblaciones locales, cada una con sus propias dinámicas sociales y de población, y cada una sujeta a factores medioambientales locales. Algunas poblaciones locales se recuperaron en pocos años, mientras que otras requirieron más tiempo o, por lo menos en un área, se redujo aún más por razones que no están claras y que bien podrían no estar relacionadas con el derrame. La evidencia de los estudios de biomarcadores de exposición continua de las nutrias a los HAP, hasta nueve años después del derrame, fue vinculada por algunos investigadores a residuos persistentes de hidrocarburos en la zona intermareal, pero esos residuos ya no tienen una suficiente toxicidad biodisponible como para tener ningún efecto ecológico significativo. Las nutrias también han sido una fuente de preocupación en otros derrames, por ejemplo, en el derrame del *Braer* de 1993 frente a las Islas Shetland, aunque los impactos documentados de ese derrame fueron relativamente limitados. Las poblaciones de nutrias europeas podrían ser menos vulnerables a los derrames en el mar, ya que son más dependientes del agua dulce.



Izquierda: muchas nutrias viven en la costa, y su pelaje recoge muy fácilmente todo el hidrocarburo en el agua o en la orilla.

vulnerables a los hidrocarburos que lleguen a la tierra. Por lo tanto, una contaminación severa por un hidrocarburo viscoso podría abrumar a algunos de los animales individuales que tengan la mala fortuna de verse afectados. Se han reportado cadáveres asfixiados de un pequeño número de focas, especialmente crías, en algunos derrames, pero no los suficientes como para hablar de un efecto significativo sobre las poblaciones. En algunos casos, las autopsias han encontrado que los animales ya estaban muertos por otras causas antes de ser cubiertos por el hidrocarburo. Un efecto subletal más común de los derrames de hidrocarburos sobre los pinnípedos ocurre debido a la exposición de las zonas sensibles de la piel (membranas mucosas) a los hidrocarburos en la superficie del agua mientras que el hidrocarburo está fresco. Se han informado observaciones de animales con los ojos y la nariz inflamadas después de varios derrames, aunque la



Abajo: los pinnípedos, al igual que estos osos marinos de Nueva Zelanda, descansan sobre las costas durante sus periodos de alimentación.



Las crías de algunas especies de focas pasan muchos días o semanas en tierra antes de que estén listas para nadar, y son potencialmente vulnerables a cualquier hidrocarburo que encalle allí.

incidencia natural de enfermedades respiratorias podría complicar la interpretación. En 1997, el derrame del *San Jorge* en Uruguay contaminó con hidrocarburos una importante colonia de lobos marinos, con las preocupaciones concomitantes sobre los impactos y las posibles alteraciones debido a las agresivas técnicas de limpieza de la costa. Aunque el derrame causó la muerte de alrededor de 5000 crías, esta mortalidad se encontró dentro del rango de la mortalidad natural y debido a la caza. El uso de la tecnología de limpieza más tradicional minimizó el riesgo de un contacto adicional entre el hidrocarburo y el animal, así como las estampidas (en las que las focas adultas pueden arrollar y matar a las crías) debido a la presencia humana (Mearns *et al.*, 1999).

Se han observado ballenas y delfines en las proximidades de numerosos derrames de hidrocarburos, pero la evidencia de los impactos sobre los animales individuales es limitada y en su mayoría circunstancial. Esto no significa que los impactos no han ocurrido, sino que si se han producido, han sido demasiado sutiles como para ser detectados. Las vías potenciales

de exposición a los hidrocarburos son similares a las de los pinnípedos; es decir, contacto con la piel, contacto con las membranas mucosas (ojos y espiráculo), inhalación de hidrocarburos, asfixia de las estructuras de alimentación (en las ballenas con barbas), ingestión del hidrocarburo durante la alimentación y la ingestión de presas contaminadas. Si bien podrían imaginarse escenarios que podrían provocar un impacto significativo a través de esas vías de exposición, la probabilidad de ocurra cualquiera de esos escenarios es baja. Los experimentos han demostrado que la piel de los cetáceos es insensible al contacto con hidrocarburos y que el proceso natural de curación de los cortes en la piel tampoco se ve afectado. La evidencia experimental también sugiere que las estructuras de barbas podrían atascarse en el peor de los escenarios, pero que se limpian a sí mismas rápidamente. La probabilidad de que un cetáceo que se está alimentando (incluso algunas ballenas con barbas) ingiera una cantidad suficiente de hidrocarburos para causar daños subletales a su sistema digestivo o para presentar una carga corporal tóxica es baja, y las autopsias de los cetáceos no han encontrado evidencia de hidrocarburos en sus intestinos. Del mismo modo, es poco probable que el contenido de hidrocarburos en la presa esté presente en cantidades suficientes para ser tóxico para un cetáceo, y la mayoría se metaboliza rápidamente. Algunos HAP se pueden acumular en los tejidos de las ballenas antes de que finalmente sean metabolizados, como sucede en todos los vertebrados. Por último, la inhalación de vapores de hidrocarburos y su contacto con las membranas mucosas podría ocurrir cerca de la fuente y en el momento en que un derrame superficial, cuando el hidrocarburo está fresco y las concentraciones de hidrocarburos volátiles son temporalmente altas, pero la probabilidad de que un cetáceo reciba una dosis suficiente como para producirle un impacto tóxico es baja.

La prueba más evidente de que puede ocurrir una mortalidad relacionada con derrames de hidrocarburos en los mamíferos marinos se publicó luego del derrame del *Exxon Valdez* de 1989. Los investigadores que estudiaban las manadas de orcas (ballenas asesinas) informaron reducciones notables (33% y 41%) en el número de dos manadas que se habían observado en las proximidades del derrame. El monitoreo continuo encontró que las dos manadas no siguieron los aumentos poblacionales mostrados por otras manadas de Alaska. Sin embargo, otros investigadores han planteado dudas acerca de la probabilidad de efectos directos producto de derrames de hidrocarburos y han sugerido una combinación de otras causas, incluido el arponado por parte de los pescadores, la vejez y otros niveles de contaminantes, como causas más probables. No ha habido una clara conclusión para este debate. Más recientemente, la investigación en Luisiana ha indicado un mal estado de salud en una población de delfines que viven en una de las bahías afectadas por hidrocarburos por el impacto del pozo Macondo de 2010 y ha sugerido que el derrame era el factor causal. Sin embargo, al momento de escribir estas líneas, la evidencia de esto es limitada. Los críticos han resaltado

una serie de factores de confusión, junto con la ausencia de una vía de exposición convincente y un mecanismo por el que los hidrocarburos del derrame podrían haber causado los efectos descritos.

Otros mamíferos que potencialmente estarían en riesgo debido a un derrame de hidrocarburos incluyen al dugongo, los manatíes y los osos polares. Los datos empíricos sobre su vulnerabilidad, sensibilidad o potencial de recuperación son prácticamente inexistentes, aunque la escasa evidencia disponible sugiere cierto potencial de preocupación. El dugongo y los manatíes viven en aguas poco profundas y son de movimiento lento, por lo que serían vulnerables y podrían tener cierta sensibilidad.

La alteración provocada por la actividad de respuesta ante los derrames de hidrocarburos, en particular el tráfico de barcos, podría afectar el comportamiento de algunos mamíferos marinos debido a la presencia de ruido, o podría aumentar la posibilidad de lesiones por golpes contra los barcos, si tiene lugar cerca de los lugares donde estos animales se alimentan o descansan.

Reptiles marinos

Las tortugas son potencialmente vulnerables a los hidrocarburos cuando entran en contacto con ellos en la superficie del mar o en la orilla. Fuera de la temporada de anidación, los adultos y los juveniles pasan relativamente poco tiempo en la superficie, pero debido a que respiran aire necesitan salir a la superficie cada cierto tiempo. Cuando están en la superficie pueden impregnarse de hidrocarburos y, en el peor de los casos, podrían asfixiarse, pero hay poca evidencia para sugerir que su piel es sensible. Las tortugas no se agrupan y se distribuyen de forma amplia, por lo que es poco probable que los impactos provoquen efectos a nivel de población. Se encuentran en mayor riesgo durante la temporada de anidación cuando las hembras adultas llegan a la costa, generalmente por la noche, y se arrastran a la cima de una playa de arena para poner sus huevos. Esta es una actividad fuertemente estacional, que podría involucrar a un gran número de hembras que regresan a la misma playa al mismo tiempo. Los nidos están enterrados profundamente en la arena, por lo que los huevos están en gran parte protegidos de la contaminación de cualquier cosa menos de una



U.S. Fish and Wildlife Service

Las tortugas recién nacidas serán vulnerables a cualquier hidrocarburo que llegue a la playa mientras salen de sus nidos y se arrastran hasta el mar.

fuerte contaminación con petróleo ligero fresco, pero las crías serán mucho más vulnerables. La eclosión y el movimiento de las crías a través de la orilla está sincronizado para reducir las pérdidas por depredación, pero esto las hace mucho más vulnerables a la contaminación por hidrocarburos si este evento coincide con un derrame. Los juveniles son mucho más sensibles a la toxicidad de los hidrocarburos que los adultos, pasan más tiempo en la superficie del mar y podrían tragarse pequeñas bolas de alquitrán. Se han reportado muertes de tortugas juveniles después de algunos derrames de hidrocarburos, y las autopsias de esos individuos a menudo han encontrado hidrocarburos y bolas de alquitrán en sus intestinos. Los efectos sobre los niveles de población local serían teóricamente posibles si hubiese un impacto severo en un sitio de anidación de tortugas durante la temporada de anidación, pero sin embargo, este efecto no ha sido reportado.

Alrededor de 450 tortugas vivas, en particular tortugas lora, contaminadas con hidrocarburos fueron recogidas en el mar durante el impacto del pozo Macondo de 2010, aunque debe haberse afectado a un mayor número de estas. La mayoría fueron llevados a centros de limpieza para su rehabilitación y posterior puesta en libertad. Al momento de escribir estas líneas, aún no se sabe si el derrame tuvo algún impacto significativo a largo plazo sobre las poblaciones de tortugas en el Golfo de México.

Otros reptiles incluyen iguanas marinas, cocodrilos, caimanes y serpientes de mar, que ocupan la superficie del mar, aguas poco profundas y las costas. Existen vías potenciales para la exposición a los hidrocarburos, pero la información sobre los efectos de los hidrocarburos en estos es limitada debido a la escasez de estudios.

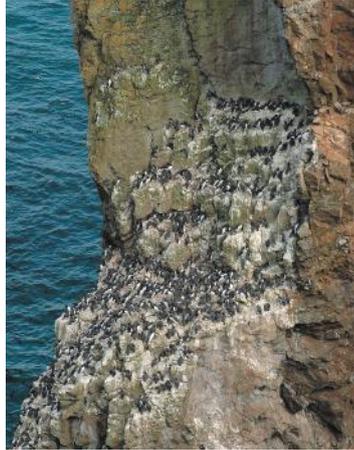
Aves

Los hidrocarburos pueden afectar a las aves mediante tres vías: mediante la contaminación física de sus plumas, lo que puede provocar hipotermia y en una capacidad reducida para moverse, alimentarse, etc.; mediante de la ingestión del hidrocarburo mientras se acicalan o consumen alimentos contaminados; y a través de la transferencia del hidrocarburo a los huevos y a las crías, lo que puede provocar una reducción de la supervivencia. Las imágenes sobrecogedoras de aves marinas muertas y discapacitadas con capas de hidrocarburos sobre sus plumas han sido el legado inmortal de una serie de derrames de hidrocarburos, y en algunas ocasiones el número confirmado de aves muertas han llegado a las decenas de miles. Como el número registrado de cadáveres y de aves vivas impregnadas de hidrocarburos es, inevitablemente subestimado, en particular en el caso de derrames en lugares remotos, el impacto real no puede ser descrito con precisión, pero a veces se cuenta con datos adicionales de los programas de monitoreo de la población en algunas zonas. La investigación sobre los efectos subletales más sutiles de la contaminación por hidrocarburos, incluidos los impactos de la contaminación crónica con hidrocarburos, también han proporcionado más información en los últimos años.

Las aves que se posan en el agua son vulnerables a las mareas negras. Muchas aves marinas se congregan, especialmente durante la temporada de reproducción, e incluso un pequeño derrame puede dar lugar a una alta mortalidad si sucede en ese mismo momento y lugar.



La vulnerabilidad y sensibilidad de las aves y las poblaciones de aves a los derrames de hidrocarburos es muy variable entre las especies y sus etapas de vida, y en gran medida su vulnerabilidad se basa en la cantidad de tiempo que pasan en la superficie del agua. Muchas aves marinas, como las golondrinas, alcatraces y pardelas, y aves costeras como los ostreros, zarapitos y chorlos, pasan poco o ningún tiempo posadas en el agua. El número de víctimas por derrames de hidrocarburos entre esas especies, en relación con las poblaciones locales, es generalmente bajo. Sin embargo, las alcas (de la familia Alcidae, que incluyen a los araos y alcas comunes), el pato de mar y los somormujos, que pasan la mayor parte de su vida en el agua, son mucho más propensos a impregnarse de hidrocarburos si una mancha de hidrocarburo superficial llega a la zona en la que están presentes.



Las alcas, al igual que estos frailecillos y araos (extremo izquierdo y centro), pasan una gran cantidad de tiempo en el agua y, por lo tanto, son vulnerables y sensibles a las mareas negras. Algunas alcas anidan en grandes colonias y se congregan en el agua en ciertas épocas del año. Las colonias de pingüinos (a la izquierda) también son altamente vulnerables a los derrames de hidrocarburos.

Las poblaciones de aquellas especies que se agrupan en el agua en lugares y en momentos determinados del año se destacan en los mapas de sensibilidad a los hidrocarburos. Algunos ejemplos notables son las agrupaciones de alcas cerca de las colonias de cría, en particular a inicios de la primavera antes de que las aves maduras regresen a sus lugares de anidación, y cerca del final de la temporada de reproducción cuando los juveniles que no pueden volar y los adultos en época de muda se preparan para su migración hacia alta mar. Algunos patos de mar y somormujos se agrupan antes de iniciar sus migraciones de larga distancia entre los sitios de reproducción de alta latitud en el verano y los sitios cálidos para el invierno, y en lugares de descanso particulares dentro de la ruta. Un gran número de negrones comunes, un pato de mar, se detienen para alimentarse en la Bahía Carmarthen, en la costa sur de Gales durante la primavera y el otoño. La bahía fue severamente afectada durante el derrame del *Sea Empress* en febrero de 1996, cerca del inicio del período de migración, y se encontraron 4700 negrones impregnados de hidrocarburos. Ello representó aproximadamente la mitad de los negrones en la bahía en ese momento, y aproximadamente el 5% de la población en el Reino Unido durante ese invierno. El monitoreo anual del negrón cada mes de noviembre mostró números muy reducidos durante dos años, pero hubo un retorno a los niveles previos al derrame después de tres años. También se mostró que ellos se alimentaban en áreas que habían sido afectados por el derrame, lo que sugería que también había una buena cantidad de bivalvos de los fondos marinos y gusanos de los que alimentaban.

Abajo a la izquierda: los limícolas, como esta variable del ostrero, no se posan en el agua, por lo que son menos vulnerables al contacto directo con el hidrocarburo. El número de víctimas mortales suele ser relativamente bajo y la recuperación es rápida.

Abajo a la derecha: garzas y otras aves descansan en una trampa para peces impregnada de hidrocarburos en la Bahía de Guanabara, cerca de Río de Janeiro.

La mayoría de los estudios posteriores al derrame han documentado la recuperación de las poblaciones de aves regionales a los niveles previos al derrame en un lapso de cinco años luego de un grave impacto del derrame de hidrocarburos, pero también se han reportado efectos a largo plazo. Para cualquier especie que cría a un máximo de solo uno o dos crías por pareja reproductora por año es probable que la recuperación





Algunas aves marinas, como estos charranes blancos, anidan y descansan en lugares que serían vulnerables a la alteración debido a la actividad de respuesta ante derrames.

Pelícanos marrones recuperándose después de haber sido limpiados, durante la respuesta a un derrame de hidrocarburos en Coatzacoalcos, México, en 2005.



de una gran mortalidad lleve algún tiempo a menos que las condiciones medioambientales (hábitat, disponibilidad de los alimentos, presión de depredación, etc.) sean ideales. Habrá una especial preocupación por las perspectivas a largo plazo de una población afectada por un derrame de hidrocarburos en caso de que esa especie ya se encuentre bajo amenaza. Dos especies de mérgulos (mérgulo de Kittlitz y mérgulo mármol) se vieron afectadas por el derrame de hidrocarburos del *Exxon Valdez* en 1989 y se recuperaron 1100 cadáveres. En el momento del derrame, el mérgulo de Kittlitz ya aparecía en la Lista Roja de la UICN y ambas especies han sido clasificadas como en peligro de extinción más recientemente, con una disminución de las poblaciones a lo largo de la mayor parte de sus rangos de edad. El derrame tuvo un pequeño pero significativo impacto en términos ecológicos sobre las poblaciones regionales de ambas especies en ese momento, pero pronto fue evidente que otros factores estaban teniendo un mayor impacto y no está claro si la mortalidad aguda producto del derrame haya tenido un efecto residual.

La recuperación de las poblaciones de aves también se ve influenciada en gran medida por el comportamiento complejo y específico de cada especie. Algunos factores importantes incluyen las agrupaciones de sub-poblaciones, los territorios, las aves que regresan al mismo sitio año tras año y las aves que no tienen crías. Esto puede dar lugar a la lenta recuperación de una población en una zona con muchos lugares de anidamiento vacantes, mientras que la población en una zona vecina se recupera rápidamente y sus sitios de anidación vuelven a ocuparse rápidamente; es posible que no haya ningún efecto aparente sobre los números de crías ya que los sitios vacantes son ocupados inmediatamente por aves en espera.

Los experimentos han demostrado que la contaminación de los huevos por hidrocarburos puede reducir la supervivencia del embrión y el éxito de la eclosión. Se ha sugerido que esto podría tener un impacto potencial sobre las poblaciones de aves, pero las observaciones de campo sugieren que ha tenido una importancia ecológica limitada. Otros estudios han demostrado que pequeñas cantidades de hidrocarburos, incluidos las películas lustrosas, en el plumaje de las aves pueden dañar la estructura fina de las plumas y sus funciones, incluida la impermeabilización. El efecto directo de la impregnación ligera de hidrocarburos sobre la función del plumaje es poco probable que provoque una mortalidad, pero las aves podrían pasar mucho tiempo adicional limpiándose al acicalarse; una pérdida de tiempo que podría dedicar a otras actividades, y que además se traduce en la ingesta de hidrocarburos. Algunas especies, como muchas gaviotas, tienen sistemas digestivos muy robustos, pero otras pueden ser sensibles a pequeñas cantidades de hidrocarburos. Los efectos potenciales de la ingesta de hidrocarburos son numerosos y pueden ser letales, dependiendo de la cantidad y la toxicidad. Varios estudios han descrito efectos sobre el funcionamiento del sistema digestivo, daño a los órganos, anemia y efectos sobre la reproducción, incluida la puesta de huevos y el éxito de la eclosión. Aunque las aves finalmente metabolizan y descomponen los contaminantes de los hidrocarburos, los HAP también se puede acumular en sus tejidos durante un período de tiempo, y esto puede ocasionar efectos inmunológicos. Sin embargo, es poco probable que los efectos subletales de la ingestión persistan durante más de una estación.

La ingestión de hidrocarburos también puede ocurrir durante la alimentación, sobre todo en el caso de las aves que se alimentan de mejillones y otros bivalvos que concentran los contaminantes de los hidrocarburos en sus tejidos, y por los carroñeros y las aves rapaces que son atraídos a los animales muertos o moribundos en la orilla. Esta es una causa potencialmente importante de mortalidad para algunas especies, pero es poco probable que los efectos subletales persistan a menos que haya una fuente importante de contaminación crónica. En los lugares donde los residuos de hidrocarburos persistentes permanecen en costas que son frecuentadas por las aves, existe cierto potencial para una exposición crónica a través de la ingestión de presas contaminadas. Algunos estudios posteriores al derrame de petróleo del *Exxon Valdez* de 1989 vincularon evidencia bioquímica de la exposición a hidrocarburos

(biomarcadores) en algunas aves a la persistencia de los residuos de hidrocarburos en algunas costas rocosas. El ostrero negro y el pato arlequín, que se alimentan entre las rocas intermareales, son más propensos a estar expuestos a la contaminación crónica por hidrocarburos mediante la ingestión de presas contaminadas. Sin embargo, otros estudios han demostrado que las aportaciones de esas fuentes se redujeron a niveles muy bajos luego de dos o tres años y que los riesgos de efectos ecológicamente significativos eran pequeños. La población regional del pato arlequín había regresado a los niveles previos al derrame para el año 1993, y mientras que la población del ostrero negro estaba en declive, no había ninguna diferencia en el éxito reproductivo entre las zonas impregnadas y no impregnadas de hidrocarburos para el año 1991.



©Peter Massas, 2010
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Histriornis_histriornis_drake_Barnegat.jpg

Se han sugerido efectos indirectos sobre las poblaciones de aves debido a los impactos en la disponibilidad del alimento para algunas especies después de determinados derrames, pero esta sigue siendo una posibilidad teórica para el peor escenario posible. Aunque una severa reducción aislada en la fuente de alimento de las aves es posible, la extensión limitada y la irregularidad de los efectos de los derrames de hidrocarburos significan que es poco probable que esto ocurra sobre todo en una proporción significativa para el rango de alimentación diario de un ave. Las alteraciones debido a actividades intensivas de limpieza de derrames de hidrocarburos, sin embargo, tiene cierto potencial para afectar el comportamiento de alimentación de las aves de humedales y por lo tanto afectar su capacidad de alimentarse de manera eficiente. En climas fríos, las reservas de energía de algunas aves, particularmente las especies migratorias, podrían ser bastante bajas.

El pato arlequín se alimenta de mejillones y otros invertebrados en las costas. Si la presa está contaminada con hidrocarburos, el pato podría recibir aportaciones contaminantes crónicas. La medida en que esto tuvo un impacto sobre las poblaciones de patos arlequín en Prince William Sound, después del derrame del Exxon Valdez de 1989 todavía está en discusión.

Hábitats en las costas y las orillas

Los impactos de los derrames de hidrocarburos en las costas se cubren con mayor detalle en la Guía de Buenas Prácticas de IPIECA-IOGP sobre este tema (IPIECA-IOGP, 2015a). Algunas de las características clave se resumen a continuación.

Las costas comprenden una gran variedad de tipos de hábitats, cada uno de los cuales se caracteriza por una comunidad diferente de plantas y animales. Muchas de las orillas fangosas más protegidas están dominadas por plantas, sobre todo marismas, manglares o halófilas, dependiendo del clima. Las algas tienden a dominar las costas rocosas protegidas, mientras que los animales invertebrados dominan las orillas expuestas a las olas. En las regiones polares muchas costas están empobrecidas en comparación con los de las regiones templadas debido a los efectos físicos del hielo del mar, mientras que los arrecifes de coral bordean algunas costas tropicales en las orillas abiertas. Muchas aves, peces y mamíferos también utilizan los hábitats costeros debido a la disponibilidad de alimentos, sustrato, nutrientes y refugio.

Los hábitats y las especies de la costa serán vulnerables a cualquier derrame de hidrocarburos en la costa, pero, como se mencionó anteriormente, la magnitud del impacto y la tasa de recuperación serán definidos en gran parte por la persistencia y el estado del hidrocarburo varado, lo que a su vez está fuertemente correlacionado con la exposición a las olas (ver la página 17). Por lo tanto, los impactos en las costas abiertas suelen ser a corto plazo, porque los hidrocarburos generalmente se eliminan rápidamente por el movimiento del agua y la recuperación de las especies afectadas es una función de los procesos ecológicos naturales. Sin embargo, la eliminación natural de los hidrocarburos de las costas protegidas es más lenta y, en lugares donde el sustrato intermareal es fangoso y dominado por pantanos o manglares, los residuos de hidrocarburos pueden persistir durante años, causando impactos a largo plazo. Algunos ejemplos de persistencia a largo plazo de hidrocarburos incluyen las marismas y costas fangosas de Buzzards Bay, Massachusetts, impregnadas de hidrocarburos durante el derrame de la barcaza Florida en 1969; las marismas en el Estrecho de Magallanes, Chile, impregnadas de hidrocarburos por el derrame del Metula de 1974; y las llanuras intermareales protegidas y el pantano de halófilas en la costa del Golfo de Arabia Saudita, contaminadas por hidrocarburos por el derrame de la Guerra del Golfo de 1991. Algunos residuos de

Ejemplos de costas impregnadas de hidrocarburos (en sentido horario desde la parte superior izquierda): rocosa; con sedimentos; manglar; y marisma.



hidrocarburos todavía están presentes en esas costas hasta el día de hoy, sobre todo en Arabia Saudita. Cada uno representa una pequeña fracción de la cantidad que se derramó, y una pequeña fracción del área que originalmente fue impregnada de hidrocarburos. Por otra parte, los residuos de hidrocarburos restantes suelen desarrollar una corteza altamente envejecida que muestra una toxicidad muy limitada o que no está disponible para la mayoría de los organismos que viven en esas zonas y que son resistentes a la biodegradación.

Aunque todas las especies intermareales potencialmente podrían verse afectadas por la contaminación por hidrocarburos, algunas son mucho más sensibles que otras. La mayoría de las algas marinas, por ejemplo, están naturalmente protegidas por una capa mucosa que resiste el hidrocarburo, mientras que las plantas de una marisma salada son fácilmente sofocadas y los manglares pueden ser destruidos por hidrocarburo viscoso que cubre una proporción significativa de los poros de respiración en sus raíces aéreas. La sensibilidad de muchos animales intermareales es similar a la descrita para los animales de los lechos marinos resultante de la presencia de hidrocarburos en el agua (ver *Vida en los lechos marinos* en las páginas 21-26), aunque una contaminación directa con hidrocarburos es una vía de exposición adicional que puede causar la sofocación de los mecanismos de alimentación, el bloqueo de madrigueras y la exposición a altas concentraciones de hidrocarburos por una duración relativamente larga con potenciales efectos subletales y letales. Esto último es ilustrado por las lapas, un grupo de caracoles que son comunes en las costas rocosas en la mayoría de las regiones: los estudios han demostrado que incluso pequeñas cantidades de hidrocarburo fresco en el pie de una lapa la narcotiza hasta que cae de la roca y posteriormente muere por desecación o depredación. En algunos derrames esto ha dado lugar a reducciones drásticas en las poblaciones locales, seguido por un rápido crecimiento de algas verdes oportunista (ver ejemplos en IPIECA-IOGP, 2015a). La recolonización de las lapas a partir de las larvas planctónicas se produce rápidamente, pero la recuperación completa de la comunidad se produce normalmente luego de dos a tres años, y podría tomar unos cinco años o más en casos poco frecuentes que involucran una severa contaminación por hidrocarburos.

Los cangrejos de madriguera son una característica común de muchas costas sedimentarias tropicales y subtropicales, sobre todo en los manglares. Los derrames de hidrocarburos pueden tener efectos graves sobre estas poblaciones, y, además, las madrigueras crean una vía para que el hidrocarburo penetre por debajo de la superficie, dejando residuos persistentes.

Manejo del impacto potencial y de la respuesta ante derrames de hidrocarburos

La respuesta a los derrames de hidrocarburos es multifacética y puede involucrar operaciones a gran escala con muchas influencias potenciales sobre el entorno marino. Las acciones de respuesta pueden incluir cambios significativos en la gestión de muchos de los recursos marinos locales, por ejemplo, el cierre temporal de las pesquerías y de otras actividades que tienen efectos prolongados sobre esos recursos. La experiencia de las respuestas de derrames pasados ha demostrado que es posible causar daños utilizando tratamientos inadecuados (“tratamiento” se utiliza aquí para incluir a todas las técnicas de limpieza) y que muchos impactos potenciales se han asociado con el despliegue de un gran número de trabajadores, vehículos y embarcaciones. Sin embargo, se ha aprendido muchas lecciones duras por lo que ahora los enfoques modernos, las técnicas, la tecnología, la gestión y la planificación de la respuesta ante derrames de hidrocarburos son ahora muy avanzados. La exigencia continua de personal capacitado y con experiencia también se está abordando y los planes modernos de contingencias para derrames de hidrocarburos incluyen regímenes de capacitación como un componente esencial. Los documentos de orientación de buenas prácticas, incluidos aquellos disponibles en esta serie, proporcionan información sobre la planificación, el manejo de los derrames y el uso adecuado de las diversas técnicas de tratamiento. Aunque aún quedan muchos desafíos, las respuestas apropiadas pueden reducir en gran medida los efectos de un derrame de hidrocarburos.

Muchos de los impactos más graves asociados con la respuesta a los derrames se deben a una inadecuada limpieza de la costa. Si bien la eliminación del hidrocarburo es beneficiosa, algunos métodos de eliminación pueden causar impactos a largo plazo y deben ser implementados solo después de una cuidadosa consideración. El daño potencial puede incluir la eliminación física o la alteración del sustrato, el daño a los sistemas de las raíces de las plantas, la conducción del hidrocarburo hacia dentro del sedimento, la dispersión del hidrocarburo hacia otros hábitats y daños a los hábitats adyacentes utilizados como accesos. Los principales factores que determinan la magnitud de los impactos son el tipo de hábitat, la escala de la actividad de limpieza y la longevidad de las especies afectadas. Los hábitats que son más sensibles a los daños físicos son los hábitats sedimentarios protegidos que están dominados por vegetación; es decir, pantanos y manglares. Estos y otros impactos potenciales de la limpieza del litoral se discuten en la Guía de Buenas Prácticas de IPIECA-IOGP sobre los impactos de los derrames de hidrocarburos en las costas (IPIECA-IOGP, 2015a).



Muchas comunidades palustres, como esta marisma impregnada de hidrocarburos por un derrame de un oleoducto de petróleo en 1989, crecen en el suave sedimento fangoso y pueden dañarse al ser pisoteadas durante la limpieza del derrame.



Elastec

Las técnicas de tratamiento en alta mar con potencial para producir efectos sobre la ecología marina incluyen el uso de dispersantes (ver páginas 41-42) y la quema controlada in situ. Este último ha sido aplicado en las mareas negras en alta mar, donde es posible mantener el hidrocarburo lo suficientemente espeso como para mantener la incineración, incluidos los derrames en hielo. Produce grandes cantidades de humo, con implicaciones para la calidad del aire, el cual se disipa rápidamente y no se espera que tenga un impacto significativo cuando la quema in situ se implementa correctamente. Los residuos quemados pueden flotar o hundirse dependiendo de las características del hidrocarburo. Los estudios han demostrado que el residuo quemado es menos tóxico que el hidrocarburo envejecido en la biota acuática, pero en los lugares en los que se hunde (por ejemplo, como se menciona en la página 25 en relación con los impactos del derrame del Haven de 1991 en Italia) podrían asfixiar a los organismos bentónicos que entran en contacto directo con el mismo. Existe un potencial de toxicidad crónica

por los metales pesados y HAP de alto peso molecular remanentes en estos residuos, pero la evidencia disponible sugiere que están atrapados en su mayoría dentro de la matriz del residuo y por lo tanto tienen una baja biodisponibilidad. Mayor información disponible en la Guía de Buenas Prácticas de IPIECA-IOGP sobre quema controlada in-situ (IPIECA-IOGP, 2015f).

Las actividades de restauración pueden considerarse las últimas etapas de una respuesta ante un derrame de hidrocarburos. Mientras que la recuperación natural de un hábitat gravemente dañado se llevará a cabo con el tiempo, la mejora de estos procesos a través de la restauración podría ser apropiada si la se considera que la velocidad natural de recuperación es demasiado larga. Se han desarrollado exitosos métodos de restauración directos para ciertos hábitats con especies dominantes que le proporcionan su estructura, en particular, algunos hábitats de marismas y manglares. Estos se discuten más a detalle en IPIECA-IOGP, 2015a. También ha habido cierto éxito con la restauración de los arrecifes de coral y los lechos de algas marinas.

Otras actividades de respuesta a derrames que tienen relevancia para la ecología marina se cubren en la Guías de Buenas Prácticas de IPIECA-IOGP para la preparación de la respuesta de la fauna (IPIECA-IOGP, 2014a) y los estudios de evaluación de la costa (SCAT) (IPIECA-IOGP, 2014b).

Análisis de Beneficio Ambiental Neto

Durante la respuesta a un derrame de hidrocarburos, muchas de las decisiones operativas son tomadas por el personal de gestión de incidentes para seleccionar las acciones que eliminarán o tratarán el hidrocarburo y que reducirán el daño global o la amenaza de daño a los recursos afectados. Algunas de estas acciones pueden tener consecuencias importantes para el medio ambiente y de los recursos socioeconómicos. Un Análisis de Beneficio Ambiental Neto (ABAN) es un proceso que toma en consideración de forma objetiva las ventajas e inconvenientes potenciales de las opciones viables de limpieza/tratamiento, y las compara con una respuesta del tipo "no hacer nada". A veces esto puede dar lugar a decisiones que requieren un compromiso entre diferentes preocupaciones medioambientales y socioeconómicas. Sin embargo, un objetivo clave será el de minimizar los impactos a largo plazo mediante la identificación de situaciones que podrían resultar en la persistencia del hidrocarburo y la evaluación de las opciones de respuesta para reducir ese riesgo. No existe una herramienta o metodología única del ABAN que sea adecuada, o apropiada, para su aplicación en todas las situaciones, pero los pasos básicos de evaluación se pueden resumir como se muestra en la Tabla 1, de conformidad con la Guía de Buenas Prácticas de IPIECA-IOGP sobre el uso del ABAN en el desarrollo de una estrategia de respuesta (IPIECA-IOGP, 2015b).

Un ejemplo de quema controlada in situ. Para mayor información sobre este tema, ver IPIECA-IOGP 2015f.

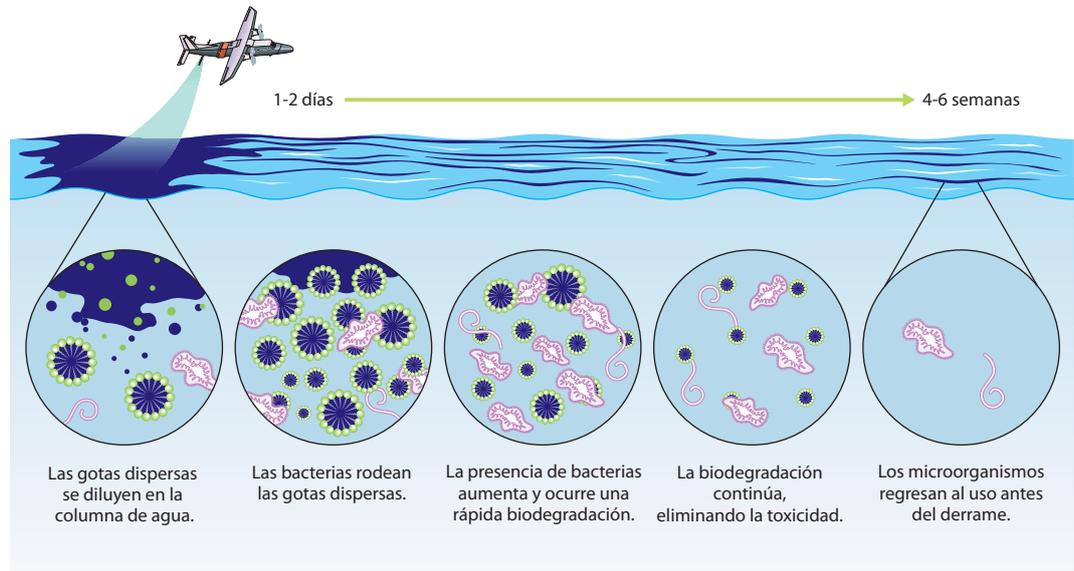
Tabla 1 Pasos típicos del ABAN dentro del proceso de planificación para contingencias

Paso del ABAN	Descripción
Evaluar los datos	La primera etapa es considerar el lugar probable del derrame y hacia donde sería transportado bajo la influencia de las corrientes y del viento a través de los diversos modelos de trayectoria de derrames de hidrocarburos que existen para este fin. También es útil saber cómo “meteorizarán” los hidrocarburos mientras flotan a la deriva. Esto es parte de la evaluación de los datos disponibles.
Predecir los resultados	La segunda etapa consiste en evaluar qué es lo que probablemente se vea afectada por el hidrocarburo derramado si no se realiza ninguna respuesta. Esto puede incluir los recursos ecológicos en alta mar, cerca de la costa y en las costas, junto con los recursos socioeconómicos. También se deben revisar la eficacia y la viabilidad del conjunto de herramientas de respuesta. Esto cubre las técnicas de respuesta, los aspectos prácticos de su utilización y la cantidad de hidrocarburo que pueden recuperar o tratar. Si las zonas amenazadas incluyen hábitats costeros sensibles a los hidrocarburos, el papel de la respuesta ante un derrame de hidrocarburos en el mar es prevenir o limitar que el hidrocarburo derramado alcance a estos hábitats. La experiencia previa puede servir de ayuda a la hora de evaluar qué técnicas de respuesta ante derrames de hidrocarburos serán probablemente más efectivas. Las consideraciones prácticas y operativas deben formar una parte muy importante del proceso del ABAN que se aplique a todas las técnicas de respuesta viables.
Equilibrio de la compensaciones	Las ventajas y desventajas de las posibles opciones de respuesta son tomadas en consideración y sopesadas frente a los impactos ecológicos y socioeconómicos de cada una para entender y sopesar ventajas y desventajas.
Seleccionar las mejores opciones	El proceso concluye con la adopción de la(s) técnica(s) de respuesta dentro de los planes de contingencias para derrames de hidrocarburos que minimicen el impacto de posibles derrames en el medio ambiente, y promover la más rápida recuperación y restauración de la zona afectada.

Los beneficios e impactos de la aplicación de dispersantes

Los dispersantes son agentes químicos que, cuando se aplican apropiadamente a los hidrocarburos mientras están flotando, mejorarán su dispersión en la forma de pequeñas gotas en la parte superior de la columna de agua, reduciendo así la cantidad de hidrocarburos en la superficie. El hidrocarburo dispersado se diluye rápidamente a niveles que suponen un riesgo de toxicidad baja y que facilitan la biodegradación (ver *El destino de los hidrocarburos* en las páginas 9-14). Los estudios también han demostrado que los dispersantes reducen la adherencia de los hidrocarburos a los sedimentos, las rocas y la biota. Al reducir de manera significativa la cantidad de hidrocarburos en la superficie, hay generalmente menos riesgo de impregnación física de hidrocarburos a la fauna y las costas de la superficie, etc., y, de manera crucial en muchas situaciones, una reducción potencial de residuos de hidrocarburos persistentes. Estas dos características, especialmente la última, reducirán el potencial de impactos a largo plazo. Sin embargo, al mejorar la dispersión y la dilución del hidrocarburo en la parte superior de la columna de agua, aparecerán concentraciones elevadas temporales de hidrocarburos. Llevar a cabo un ABAN para la aplicación propuesta de dispersante debería evaluar si una respuesta de este tipo puede proporcionar una reducción significativa de los hidrocarburos en la superficie, ya sea que ello reducirá significativamente el potencial de hidrocarburos persistentes y los impactos sobre la fauna y el hábitat de la superficie y de la costa, y si la mayor concentración de hidrocarburos en el agua presenta un riesgo significativo para los peces, crustáceos y otras especies acuáticas. Las regulaciones para el uso de dispersantes normalmente autorizan previamente el uso de productos aprobados en aguas más profundas (por ejemplo 10-20 m); se necesita una autorización especial para su uso en aguas poco profundas si se considera que los beneficios podrían ser mayores que los impactos.

Figura 6 El proceso típico de degradación para hidrocarburos derramados luego de la aplicación del dispersante

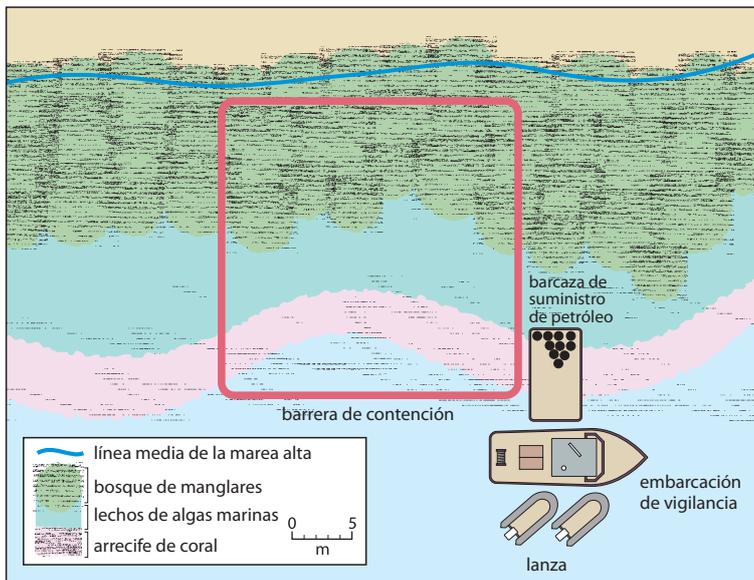


La Figura 6 ilustra el proceso de biodegradación para hidrocarburos derramados luego de la aplicación de dispersante sobre la superficie de la mancha de hidrocarburo.

En la década de 1980 se llevaron a cabo tres grandes experimentos de campo para comparar los efectos de los hidrocarburos dispersados químicamente y sin dispersar en las zonas cercanas a la costa; es decir, en el Ártico y en climas templados y tropicales. El primero fue el proyecto de derrame de hidrocarburos en la isla de Baffin (BIOS, por sus siglas en inglés) (1980-1983), en el este del Ártico de Canadá. El segundo fue el experimento

Searsport (1981) en Maine, en la costa noreste de los EE. UU. El tercero fue el estudio TROPICS (1984) en la costa caribeña de Panamá (ilustrado en la Figura 7). Cada uno incluyó estudios previos y posteriores al derrame de los hábitats y las comunidades, y de las concentraciones de hidrocarburos en agua, sedimentos y biota. Además de las diferencias de hábitat (desde costas y lechos marinos afectados por el hielo hasta manglares y arrecifes de coral), no hubo diferencias en algunos de los objetivos y de los diseños de los tres experimentos. Sin embargo, todos ellos llegaron a la conclusión de que la aplicación de dispersantes podría reducir la contaminación por hidrocarburos en la costa y no provocaría impactos submareales significativos o en la contaminación persistente de los sedimentos. El monitoreo a largo plazo continuó durante algunos años después de los estudios, sobre todo por medio del estudio TROPICS donde los estudios más recientes describen la persistencia de los hidrocarburos y los impactos asociados a los manglares, hasta por 25 años, en las zonas que fueron afectadas por hidrocarburos no dispersados.

Figura 7 El estudio TROPICS de 1984 demostró algunos de los beneficios potenciales del uso de dispersantes





ITOPF

El uso de dispersantes fue un factor importante en la reducción del volumen y la extensión geográfica de la contaminación por hidrocarburos en la costa luego del hundimiento del Sea Empress en 1996.

Durante el derrame del *Sea Empress* en 1996, una operación de aspersión de dispersante a gran escala mejoró ampliamente la dispersión de una proporción significativa de las 72.000 toneladas de crudo ligero. Se estima que alrededor de la mitad del hidrocarburo se dispersó en la columna de agua, en comparación con alrededor de una quinta parte o menos si no se hubiera utilizado dispersante. Las concentraciones elevadas de hidrocarburos en el agua generaron impactos en la vida en los lechos marinos (ver páginas 21-26), pero la recuperación de esos recursos fue rápida y no hubo una contaminación persistente de sedimentos submareales. Se estimó que la combinación de la dispersión natural y química impidió que un potencial de 120.000 toneladas de emulsión llegara a la costa, en lugar de las 10.000-15.000 toneladas que sí lo hicieron. La operación dispersante fue un factor importante en la reducción tanto del volumen de contaminación por hidrocarburos del litoral como de su expansión geográfica.

La aplicación de dispersante bajo la superficie del mar es una técnica relativamente nueva que se utilizó durante el impacto del pozo Macondo de 2010 en el Golfo de México. Se dispersa una gran cantidad de hidrocarburos que de otro modo habrían llegado a la superficie y habrían tenido potencialmente un mayor impacto sobre la vida de la superficie y de las costas. Los estudios sobre el destino de los hidrocarburos en la columna de agua mostraron que la biodegradación debido a las bacterias se estaba produciendo rápidamente, lo que reduce en gran medida el potencial de residuos persistentes en el agua o en los sedimentos. Se están realizando investigaciones sobre el destino de los hidrocarburos del derrame.

Puede encontrarse más información sobre este tema en las Guías de Buenas Prácticas de IPIECA-IOGP sobre la aplicación de dispersantes, tanto en la superficie como bajo la superficie del mar; ver IPIECA-IOGP 2015c y 2015d, respectivamente.

Evaluación de daños de derrames de hidrocarburos, actividades clave

Los derrames de hidrocarburos en el mar pueden ser eventos de alto perfil que pueden provocar impactos medioambientales y afectar la vida de muchas personas. Es comprensible que se exprese un interés tanto por personas como por organizaciones en saber qué daño se hizo y cuánto tiempo tardará en recuperarse. La mayoría de los países tienen regulaciones y políticas que requieren cierto nivel de evaluación del impacto sobre las poblaciones de peces comerciales, el aire, el agua y la calidad de los sedimentos, los sitios designados para la conservación de la naturaleza, las especies protegidas y la salud humana. Sin embargo, si bien las agencias gubernamentales pueden contar programas de monitoreo de la calidad del medio ambiente para la evaluación de rutina, estos no están diseñados para impactos de contaminación a gran escala. Los documentos de orientación sobre la forma de llevar a cabo una evaluación de los daños de un derrame de hidrocarburos están disponibles en algunos países y regiones, y la Organización Marítima Internacional y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente han producido conjuntamente un documento de orientación internacional (OMI/PNUMA, 2009). Algunos de los requisitos fundamentales se describen a continuación.

Los datos previos al derrame sobre las comunidades marinas que han sido afectadas por un derrame a menudo son limitados o inexistentes. Por lo tanto, los biólogos comienzan el proceso de recopilación de la información de las áreas impregnadas de hidrocarburos tan pronto como sea posible, como parte de una evaluación de impacto.



La adquisición de buenos datos basales previos al derrame puede ser un reto logístico y financiero. La prioridad más alta es recopilar datos previos al derrame sobre la contaminación de hidrocarburos. En muchos derrames por lo general hay un cierto potencial para recoger muestras de agua, sedimentos y biota previas al impacto (en particular especies comerciales) en la trayectoria prevista del petróleo. También es importante recoger muestras del hidrocarburo de la fuente cuando está fresco al comienzo del derrame y también a intervalos de tiempo desde diferentes hábitats mientras envejece. Se requieren procedimientos rigurosos de muestreo para los hidrocarburos e hidrocarburos en aguas, sedimentos y biota, a fin de asegurar que no haya contaminación de otras fuentes. Además, la posterior manipulación y transporte de las muestras a los laboratorios para su análisis debe cumplir una estricta cadena de procedimientos de custodia. Será de gran utilidad identificar y acceder a los datos ya existentes de la zona. Se puede acceder a los datos medioambientales a través de herramientas en línea, tales como la IPIECA Marine Geospatial Bibliography (<http://mgb.ipieca.org>).

Los datos biológicos basales previos al derrame y al impacto también serán de gran valor, sobre todo si han sido recabados o actualizados al menos un año antes del derrame. Sin embargo, el nivel de las fluctuaciones naturales para muchas poblaciones y comunidades puede ser considerable, por lo que los datos antiguos podrían tener un valor limitado. Para las especies que están siendo afectados por el cambio a largo plazo también puede haber líneas de base en constante movimiento que se deben considerar. Las fotografías fijas recientes previas al derrame y al impacto con indicación de los hábitats y comunidades visibles, sobre todo imágenes aéreas de pantanos y manglares, también serán de gran valor.

La cartografía de la distribución del hidrocarburo de un derrame es una parte esencial de una evaluación de daños. Gran parte de esto puede hacerse mediante un reconocimiento aéreo. Las fotografías aéreas de las comunidades impregnadas de hidrocarburos también pueden proporcionar información valiosa sobre su extensión y estado.



La información sobre la distribución y concentración del hidrocarburo, durante el transcurso del derrame, será fundamental para cualquier evaluación de impacto y proporcionar evidencia de la exposición. Esto se logra a menudo mediante un reconocimiento aéreo, un programa de toma de muestras (como se mencionó anteriormente, incluyendo la columna de agua, la costa y el lecho marino) y los estudios de distribución del hidrocarburo en la costa. Este último normalmente se lleva a cabo

utilizando la técnica de evaluación limpieza de costas (SCAT, por sus siglas en inglés), que está diseñada principalmente para proporcionar apoyo operativo para la respuesta costera, pero también puede proporcionar información valiosa sobre la posible exposición de la vida del litoral al hidrocarburo. Para obtener más información sobre SCAT ver IPIECA-IOGP, 2014b. Como muchos de los estudios de los efectos ecológicos se limitan necesariamente a áreas pequeñas, la información de amplia escala sobre la distribución del hidrocarburo también puede aumentar su representatividad.

Algunas de las evidencias más conspicuas de los impactos de derrames de hidrocarburos en animales y plantas son transitorias, e incluyen la fauna muerta, varamientos de bivalvos, plantas ennegrecidas o descoloridas y la colonización por oportunistas. Se deben tomar registros y fotografías de como ocurren estos impactos antes de que la evidencia desaparezca. La fauna muerta debe ser recogida y almacenada adecuadamente para su posible análisis posterior. Para obtener más información sobre la preparación y la respuesta ante un impacto de fauna impregnada de hidrocarburos consulte la Guía de Buenas Prácticas de IPIECA-IOGP sobre la preparación de la fauna para la respuesta ante derrames de hidrocarburos (IPIECA-IOGP, 2014a).



Registrar las observaciones de la fauna impregnada de hidrocarburos es un aspecto importante de una evaluación de los daños. Esta tortuga impregnada de hidrocarburos fue encontrada por los trabajadores de limpieza durante el derrame del Estrella Pampeana de 1999 en Argentina.

Unos objetivos claramente definidos son esenciales para un estudio de evaluación de daños bien organizado. Esto debe incluir una definición del alcance (geográfico, límites de tiempo, escala del estudio y criterios de valoración) y decisiones sobre si la evaluación se centrará en umbrales definidos, comparaciones con la información basal, la comparación entre sitios de referencia o tendencias en el tiempo. Es importante tener en cuenta la posibilidad real de que incluso un estudio detallado todavía podría no proporcionar la prueba estadística de que hubo, o de que no hubo, un impacto. Cuando el daño es evidente, habrá un deseo de establecer las escalas de tiempo de recuperación, pero esto podría convertirse en una actividad abierta a menos que se haya definido un criterio de valoración. Un objetivo fundamental de muchos estudios será evaluar el mérito de las demandas de indemnización.

Limitaciones logísticas y presupuestarias significan que tendrá que haber alguna priorización de los recursos ecológicos que van a ser evaluados. Una vez elegidos, el diseño del estudio deberá basarse en los objetivos definidos. Para cualquier recurso en particular habrá muchas técnicas, mediciones, sitios y sistemas de muestreo posibles a considerar.

Cuando un estudio encuentra evidencia de un impacto, también será necesario establecer un mecanismo (vía) realista por el que el derrame de hidrocarburos podría haber causado ese daño.

A medida que los programas de muestreo biológicos y químicos se llevan a cabo, a menudo por diferentes laboratorios o personal, es importante que los programas estén diseñados de manera conjunta y que se mantenga la coordinación. Esto no siempre es fácil de conseguir, pero, para el caso de las costas, la información detallada sobre la distribución de los hidrocarburos a partir de un programa SCAT puede proporcionar un conjunto común de datos útiles que vincule a los estudios y ayude en su diseño.

Referencias y lecturas adicionales

Manuales y documentos guía

IMO (1998). *Manual on Oil Pollution*. Section VI: IMO Guidelines for Sampling and Identification of Oil Spills. 44 pp.

IMO/UNEP (2009). *IMO/UNEP Guidance Manual on the Assessment and Restoration of Environmental Damage following Marine Oil Spills*. 2009 Edition. London, UK, 104 pp.

IPIECA-IOGP (2014). *A guide to shoreline clean-up techniques*. IPIECA-IOGP Good Practice Guide Series, Oil Spill Response Joint Industry Project (OSR-JIP). IOGP Report 521. <http://oilspillresponseproject.org>

IPIECA-IOGP (2014a). *Wildlife response preparedness*. IPIECA-IOGP Good Practice Guide Series, Oil Spill Response Joint Industry Project (OSR-JIP). IOGP Report Number 516. <http://oilspillresponseproject.org>

IPIECA-IOGP (2014b). *A guide to oiled shoreline assessment (SCAT) surveys*. IPIECA-IOGP Good Practice Guide Series, Oil Spill Response Joint Industry Project (OSR-JIP). IOGP Report Number 504. <http://oilspillresponseproject.org>

IPIECA-IOGP (2015). *Response strategy development using net environmental benefit analysis (NEBA)*. IPIECA-IOGP Good Practice Guide Series, Oil Spill Response Joint Industry Project (OSR-JIP). IOGP Report 527. <http://oilspillresponseproject.org>

IPIECA-IOGP (2015a). *Impacts of oil spills on shorelines*. IPIECA-IOGP Good Practice Guide Series, Oil Spill Response Joint Industry Project (OSR-JIP). IOGP Report Number 534. <http://oilspillresponseproject.org>

IPIECA-IOGP (2015b). *Response strategy development using net environmental benefit analysis (NEBA)*. IPIECA-IOGP Good Practice Guide Series, Oil Spill Response Joint Industry Project (OSR-JIP). IOGP Report 527. <http://oilspillresponseproject.org>

IPIECA-IOGP (2015c). *Dispersants: surface application*. IPIECA-IOGP Good Practice Guide Series, Oil Spill Response Joint Industry Project (OSR-JIP). IOGP Report 532. <http://oilspillresponseproject.org>

IPIECA-IOGP (2015d). *Dispersants: subsea application*. IPIECA-IOGP Good Practice Guide Series, Oil Spill Response Joint Industry Project (OSR-JIP). IOGP Report 533. <http://oilspillresponseproject.org>

IPIECA-IOGP (2015e). *Oil spills: inland response*. IPIECA-IOGP Good Practice Guide Series, Oil Spill Response Joint Industry Project (OSR-JIP). IOGP Report 514. <http://oilspillresponseproject.org>

IPIECA-IOGP (2015f). *In-situ burning of spilled oil*. IPIECA-IOGP Good Practice Guide Series, Oil Spill Response Joint Industry Project (OSR-JIP). IOGP Report 523. <http://oilspillresponseproject.org>

ITOPF (2011). *Effects of Oil Pollution on the Marine Environment*. Technical Information Paper (TIP) No. 13, International Tanker Owners Pollution Federation.

ITOPF (2011a). *Fate of marine oil spills*. Technical Information Paper (TIP) No. 2, International Tanker Owners Pollution Federation.

NOAA (2010). *Characteristic Coastal Habitats: Choosing Spill Response Alternatives*. U.S. Dept. of Commerce. Seattle, WA: Emergency Response Division, Office of Response and Restoration, National Oceanic and Atmospheric Administration. 86 pp. Revised, 2010; reprinted 2013.

NOAA (2010). *Characteristics of Response Strategies: A Guide for Spill Response Planning in Marine Environments*. U.S. Dept. of Commerce. Seattle, WA: Emergency Response Division, Office of Response and Restoration, National Oceanic and Atmospheric Administration. 76 pp. Revised, 2010; reprinted 2013.

NOAA (2015). ADIOS (Automated Data Inquiry for Oil Spills). NOAA's oil weathering model—an oil spill response tool that models how different types of oil weather (undergo physical and chemical changes) in the marine environment. Website of the NOAA Office of Response and Restoration, US Department of Commerce. <http://response.restoration.noaa.gov/adios>

Literatura sobre el destino y los efectos

AMAP (2008). *Oil and Gas Activities in the Arctic: Effects and Potential Effects*. Arctic Monitoring and Assessment Programme, Oslo, Norway. www.amap.no/documents/18/scientific/21

Anderson, J. W. and Lee, R. F. (2006). Use of biomarkers in oil spill risk assessment in the marine environment. In *Human and Ecological Risk Assessment*, Vol. 12, Issue 6, pp. 1192–1222.

ASM (2011). *FAQ: Microbes & Oil Spills*. Published for the American Society for Microbiology by the American Academy of Microbiology. 13 pp. <http://academy.asm.org/index.php/faq-series/436-faq-microbes-and-oil-spills>

Baker, J. M., Clark, R. B., Kingston, P. F. and Jenkins, R. H. (1990). *Natural Recovery of Cold Water Marine Environments After an Oil Spill*. Presented at the Thirteenth Annual Arctic and Marine Oilspill Program Technical Seminar, June 1990, 111 pp.

Boehm, P. D., Page, D. S., Brown, J. S., Neff, J. M., Bragg, J. R. and Atlas R. M. (2008). Distribution and Weathering of Crude Oil Residues on Shorelines 18 Years After the *Exxon Valdez* Spill. In *Environmental Science and Technology*. Vol. 42, Issue 24, pp. 9210–9216.

Cosco Busan Oil Spill Trustees (2012). *Cosco Busan Oil Spill Final Damage Assessment and Restoration Plan/Environmental Assessment*. Prepared by California Department of Fish and Game, California State Lands Commission, National Oceanic and Atmospheric Administration, United States Fish and Wildlife Service, National Park Service, Bureau of Land Management. www.fws.gov/contaminants/RestorationPlans/CoscoBusan/Cosco_Settlement/FinalCoscoBusanDARP.pdf

ESGOSS (1994). *The Environmental Impact of the Wreck of the Braer*. The Ecological Steering Group on the oil spill in Shetland. Published by The Scottish Office, Edinburgh, UK. 200 pp.

Exxon Valdez Oil Spill Trustee Council (2010). *Exxon Valdez Oil Spill Restoration Plan: 2010 Update. Injured Resources and Services*. Anchorage, AK. 46 pp.

Geraci, J. R. and St. Aubin, D. J. (1990). *Sea Mammals and Oil: Confronting the Risks*. Academic Press. 282 pp.

Gesteira, J. L. G. and Dauvin J. C. (2000). Amphipods are Good Bioindicators of the Impact of Oil Spills on Soft-Bottom Macrobenthic Communities. In *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 40, Issue 11, pp. 1017-1027.

Harwell, M. A. and Gentile, J. H. (2006). Ecological significance of residual exposures and effects from the Exxon Valdez oil spill. In *Integrated Environmental Assessment and Management*, Vol. 2, Issue 3, pp. 204-246.

Integral Consulting Inc. (2006). *Information Synthesis and Recovery Recommendations for Resources and Services Injured by the Exxon Valdez Oil Spill*. Restoration Project 060783, Final Report. Integral Consulting, Mercer Island, WA 98040. Anchorage, AK.

Jones, D. A., Plaza, J., Watt, I., Al Sanei, M. (1998). Long-term (1991–1995) monitoring of the intertidal biota of Saudi Arabia after the 1991 Gulf War oil spill. In *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 36, No. 6, pp. 472–489.

King, G. M., Kostka, J. E., Hazen, T. C., Sobecky, P. A. (2015). Microbial Responses to the Deepwater Horizon Oil Spill: From Coastal Wetlands to the Deep Sea. In *Annual Review of Marine Science*, Vol. 7, pp. 377–401.

Kingston, P. F. (1999). Recovery of the Marine Environment Following the Braer Spill, Shetland. *International Oil Spill Conference Proceedings: March 1999*, Vol. 1999, No. 1, pp. 103-109.

Kingston, P. F. (2002). Long-term environmental impact of oil spills. In *Spill Science and Technology Bulletin*, Vol. 7, No. 1-2, pp. 53–61.

Kirby, M. F., Lyons, B. P., Waldock, M. J., Woodhead, R. J., Goodsir, F., Law, R. J., Matthiessen, P., Neall, P., Stewart, C., Thain, J. E., Tylor, T. and Feist, S. W. (2000). *Biomarkers of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) exposure in fish and their application in marine monitoring*. Centre for Environment, Fisheries and Aquaculture Science (CEFAS), Science Series Technical Report No. 110. 30 pp.

Lane, S. M., Smith, C. R., Mitchell, J., Balmer, B. C., Barry, K. P., McDonald, T., Mori, C. S., Rosel, P. E., Rowles, T. K., Speakman, T. R., Townsend, F. I., Tumlin, M. C., Wells, R. S., Zolman, E. S. and Schwacke, L. H. (2015). Reproductive outcome and survival of common bottlenose dolphins sampled in Barataria Bay, Louisiana, USA, following the Deepwater Horizon oil spill. In *Proceedings of the Royal Society B*. 282:1994-2001.

Law, R. J. and Hellou, J. (1999). Contamination of fish and shellfish following oil spill incidents. In *Environmental Geosciences*, Vol. 6, Issue 2, pp. 90–98.

Law, R. J., Kirby, M. F., Moore, J., Barry, J., Sapp, M. and Balaam, J. (2011). *PREMIAM – Pollution Response in Emergencies Marine Impact Assessment and Monitoring: Post-incident monitoring guidelines*. Science Series Technical Report No. 146, Cefas, Lowestoft, 164 pp.

- Lee, R. F. and Anderson, J. W. (2005). Significance of cytochrome P450 system responses and levels of bile fluorescent aromatic compounds in marine wildlife following oil spills. In *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 50, Issue 7, pp. 705-723.
- Lee, R. F. and Page, D. S. (1997). Petroleum hydrocarbons and their effects in subtidal regions after major oil spills. In *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 34, Issue 11, pp. 928-940.
- Leighton, F. A. (1993). The toxicity of petroleum oils to birds. In *Environmental Reviews*, Vol. 1, No. 2, pp. 92-103.
- Loughlin, T. R. (ed) (1994). *Marine Mammals and the Exxon Valdez*. Academic Press, San Diego, CA, USA.
- McFarlin, K. M., Prince, R. C., Perkins, R. and Leigh, M. B. (2014). Biodegradation of dispersed oil in arctic seawater at -1°C. *PLoS ONE* 9(1): e84297. doi:10.1371/journal.pone.0084297
- Mearns, A. J., Levine, E., Yender, R., Helton, D. and Loughlin, T. (1999). Protecting Fur Seals During Spill Response: Lessons from the *San Jorge* (Uruguay) Oil Spill. In *International Oil Spill Conference Proceedings: March 1999*, Vol. 1999, No. 1, pp. 467-470.
doi: <http://dx.doi.org/10.7901/2169-3358-1999-1-467>
- Michel J., Csulak F., French D. and Sperduto, M. (1997). Natural resource impacts from the *North Cape* oil spill. In *International Oil Spill Conference Proceedings: April 1997*, Vol. 1997, No. 1, pp. 841-850.
- Montagna, P. A., Baguley, J. G., Cooksey, C., Hartwell, I., Hyde, L. J. et al. (2013). *Deep-Sea Benthic Footprint of the Deepwater Horizon Blowout*. *PLoS ONE* 8(8): e70540. doi:10.1371/journal.pone.0070540
- Moore, J. (2006). *State of the marine environment in south west Wales 10 years after the Sea Empress oil spill*. A report to the Countryside Council for Wales from Coastal Assessment, Liaison & Monitoring, Coshaston, Pembrokeshire. CCW Marine Monitoring Report No. 21. 30 pp.
- Moore, J. (2006). Long term ecological impacts of marine oil spills. In: *Proceedings of the Interspill 2006 Conference*, held at London ExCeL, 2-23 March 2006.
- National Academy of Sciences (1985). *Oil in the Sea: Inputs, Fates and Effects*. National Academies Press, Washington D.C. 601 pp.
- National Academy of Sciences (2003). *Oil in the Sea III: Inputs, fates and effects*. Washington: National Academies Press, Washington D.C. 280 pp.
- National Research Council (2005). *Oil Spill Dispersants: Efficacy and Effects*. National Academies Press, Washington D.C. 378 pp.
- NOAA (2010). *Oil and Sea Turtles: Biology, Planning, and Response*. US National Oceanic and Atmospheric Administration, Office of Response and Restoration. 116 pp.

NOAA (2010). *Oil Spills in Coral Reefs. Planning & Response Considerations*. National Oceanic and Atmospheric Administration, Office of Response and Restoration. 82 pp.

NOAA (2010). *Oil Spills in Mangroves. Planning & Response Considerations*. National Oceanic and Atmospheric Administration, Office of Response and Restoration. 70 pp.

NOAA (2013). *Oil Spills in Marshes. Planning & Response Considerations*. National Oceanic and Atmospheric Administration, Office of Response and Restoration. 125 pp.

O'Hara, P. D. and Morandin, L. A. (2010). Effects of sheens associated with offshore oil and gas development on the feather microstructure of pelagic seabirds. In *Marine Pollution Bulletin*, Volume 60, Issue 5, pp. 672-678.

Owens, E. H. and Sergy, G. A. 2005. Time Series Observations of Marsh Recovery and Pavement Persistence at Three Metula Spill Sites after 30½ Years. In: *Proceedings of the 28th Arctic and Marine Oilspill Programme (AMOP) Tech. Seminar, Environment*, pp. 463-472.

Peterson, C. H., Rice, S. D., Short, J. W., Esler, D., Bodkin, J. L., Ballachey, B. E. and Irons, D. B. (2003). Long-Term Ecosystem Response to the Exxon Valdez Oil Spill. In *Science*, Vol. 302, No. 5653, pp. 2082-2086. DOI: 10.1126/science.1084282

Price, A. R. G., Downing, N., Fowler, S. W., Hardy, J. T., Le Tissier, M., Mathews, C. P., McGlade, J. M., Medley, P. A. H., Oregioni, B., Readman, J. W., Roberts, C. M. and Wrathall, T. J. (1994). *The 1991 Gulf War: Environmental Assessments of IUCN and Collaborators*. A Marine Conservation and Development Report. IUCN, Gland, Switzerland. xii + 48 pp.

Rice, S. D., Spies, R. B., Wolfe, D. A., Wright, B. A. (editors). (1993). *Proceedings of the Exxon Valdez Oil Spill Symposium*. American Fisheries Society, Symposium 18, held on 2-5 February 1993 at Anchorage, Alaska. American Fisheries Society, Bethesda, Maryland, USA.

SEEEC (1998). *The environmental impact of the Sea Empress oil spill*. Final Report of the Sea Empress Environmental Evaluation Committee. Her Majesty's Stationery Office, London, UK.

Wells, P. G., Butler, J. N. and Hughes, J. S. (editors) (1995). *Exxon Valdez Oil Spill: Fate and Effects in Alaskan Waters*. Philadelphia (PA): American Society for Testing and Materials. ASTM Special Technical Report (STP) 1219.

Wiens, J. A. (ed.) (2013). *Oil in the Environment. Legacies and Lessons of the Exxon Valdez Oil Spill*. Cambridge University Press. 458 pp.

Yender, R., Michel J. and Lord C. (2002). *Managing Seafood Safety after an Oil Spill*. Seattle: Hazardous Materials Response Division, Office of Response and Restoration, National Oceanic and Atmospheric Administration. 72 pp.

Sitios web de utilidad

Deepwater Horizon, Bibliography of Published Research:
www.lib.noaa.gov/researchtools/subjectguides/dwh.html

Exxon Valdez Oil Spill Trustee Council: www.evostc.state.ak.us

Interspill: www.interspill.org/previous-events

IOSC: www.ioscproceedings.org/loi/iosc

IPIECA: www.ipieca.org/library

ITOPF: www.itopf.com/knowledge-resources

NOAA: <http://response.restoration.noaa.gov/publications>

PREMIAM: www.cefas.defra.gov.uk/premiam/publications.aspx

Agradecimientos

Este documento es autoría de Jon Moore (CALM) bajo el auspicio del Impacts Working Group.

Esta página se ha dejado intencionalmente en blanco.

IPIECA

IPIECA es la asociación de la industria global del petróleo y del gas para cuestiones medioambientales y sociales. Desarrolla, comparte y fomenta las buenas prácticas y el conocimiento para ayudar a la industria a mejorar su desempeño medioambiental y social; y es el canal de comunicación principal que la industria tiene con las Naciones Unidas. A través de sus grupos de trabajo dirigidos por miembros y del liderazgo de sus directivos, IPIECA reúne la experiencia técnica colectiva de las compañías y asociaciones del petróleo y del gas. Su posición única dentro de la industria permite a sus miembros responder con eficacia a los principales asuntos medioambientales y sociales.

www.ipieca.org



IOGP representa a la industria procesadora de materias primas del petróleo y del gas ante organizaciones internacionales como la Organización Marítima Internacional, los convenios de mares regionales del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP) y otros grupos que se encuentran bajo el auspicio de las Naciones Unidas. A nivel regional, IOGP es el representante de la industria ante la Comisión Europea y el Parlamento Europeo y la Comisión OSPAR para el Nordeste atlántico. Igualmente importante es el papel de IOGP en la elaboración de las mejores prácticas, especialmente en las áreas de salud, seguridad, medio ambiente y responsabilidad social.

www.iogp.org.uk

