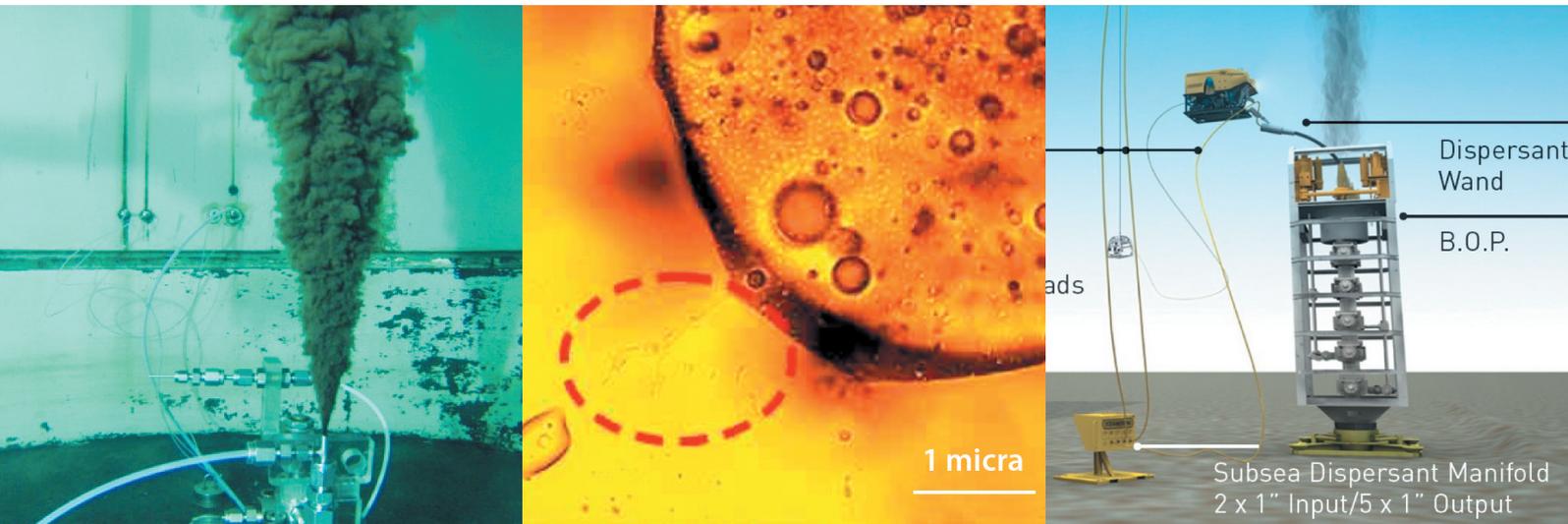


Dispersantes: aplicación bajo la superficie del mar

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



IPIECA

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

Piso 14, City Tower, 40 Basinghall Street, Londres 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 registrada

Piso 14, City Tower, 40 Basinghall Street, Londres EC2V 5DE, Reino Unido

Teléfono: +44 (0)20 3763 9700 Fax: +44 (0)20 3763 9701

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

Oficina de Houston

10777 Westheimer Road, Suite 1100, Houston, Texas 77042, Estados Unidos

Teléfono: +1 (713) 470 0315 Correo electrónico: reception@iogp.org

Informe de IOGP N.º 533

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.

Dispersantes: aplicación bajo la superficie del mar

Directrices de buenas prácticas para el personal de
manejo de incidentes 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 impacto en abril de 2010 con el control del pozo petrolífero en el Golfo de México.

Nota sobre las buenas prácticas

"Buenas prácticas" en este contexto 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	Exposición de los organismos marinos por ingestión de las gotas de hidrocarburo dispersado	27
Resumen ejecutivo	4	Biodegradación de los hidrocarburos	27
El papel del uso de dispersantes en respuestas a derrames de hidrocarburos	6	Análisis de beneficio ambiental neto	29
Comportamiento de los hidrocarburos liberados bajo la superficie del mar	7	Paso 1: Evaluar los datos	30
Reventón bajo la superficie del mar	8	Paso 2: Predecir los resultados	30
Otras descargas bajo de la superficie del mar	10	Paso 3: Sopesar ventajas y desventajas	31
Posibles consecuencias de los hidrocarburos liberados bajo la superficie del mar	11	Paso 4: Seleccionar las mejores opciones	34
Potencial de efectos en la columna de agua	11	Normativa acerca del uso de dispersantes	35
Potential for effects on the sea surface	12	Normativas para la aprobación de productos dispersantes para uso bajo la superficie del mar	35
Respuesta a descargas bajo la superficie del mar	14	Normativas para la autorización del empleo de dispersantes para uso bajo la superficie del mar	35
Respuesta bajo la superficie del mar	14	Experiencia: el incidente del Macondo	36
Los dispersantes y su funcionamiento	16	Descarga de hidrocarburos y gas bajo la superficie del mar en el pozo Macondo	36
Composición de los dispersantes modernos	16	Uso de dispersantes en el pozo Macondo	38
Mecanismo de acción de los dispersantes bajo la superficie del mar	17	Requisitos de monitoreo de la columna de agua	43
Beneficios y riesgos potenciales del uso de dispersantes bajo la superficie del mar	19	Evaluación de daños a los recursos naturales	48
Capacidades y límites	21	Aspectos operativos: aspectos generales	49
Capacidades del uso de dispersantes bajo la superficie del mar	21	Equipo necesario	49
Límites a la aplicación de dispersantes bajo la superficie del mar	22	Reservas de dispersante	50
Toxicidad y capacidad de biodegradación de los hidrocarburos	23	Implementación de equipo para SSDI	50
Compuestos químicos presentes en los hidrocarburos crudos	23	Tasa de tratamiento de dispersantes bajo la superficie del mar	51
Compuestos químicos potencialmente tóxicos de los hidrocarburos	23	Fines del monitoreo y la toma de muestras bajo la superficie del mar	52
Prueba de toxicidad de los dispersantes y de los hidrocarburos dispersados	23	Conclusión	55
Exposición a hidrocarburos, hidrocarburos dispersados y compuestos hidrosolubles de los hidrocarburos	26	Anexo: Esquema de ABAN para cuatro escenarios de planificación de descargas bajo el nivel del mar	57
Efectos del uso de dispersantes bajo la superficie del mar	26	Referencias	65
		Agradecimientos	70

Resumen ejecutivo

El motivo para el uso de dispersantes, ya sea en hidrocarburos flotantes o mediante aplicación bajo la superficie del mar, es el mismo: minimizar el daño ecológico y socioeconómico en general al evitar que los hidrocarburos derramados deriven hasta hábitats cercanos a la costa o costeros y a la costa. El uso de dispersantes sobre hidrocarburos flotantes rompe la superficie de la mancha en pequeñas gotas de hidrocarburos que se dispersan, se diluyen rápidamente y posteriormente se biodegradan en la capa superior de la columna de agua. El uso de dispersantes bajo la superficie del mar tiene como objetivo evitar que los hidrocarburos derramados bajo la superficie alcancen la superficie del agua al dispersar los hidrocarburos en el agua cerca del derrame. Esto proporciona un gran beneficio a la salud y la seguridad al reducir ampliamente la exposición a los compuestos orgánicos volátiles (VOC, por sus siglas en inglés) del personal de respuesta que se encuentra cerca del sitio del derrame. Al agregarse dispersantes a los hidrocarburos y gas liberados bajo la superficie del mar se ocasiona que una mayor proporción del hidrocarburo derramado se descomponga en pequeñas gotas que se dispersarán, se diluirán y se biodegradarán en la columna de agua, al contrario de las gotas mayores de hidrocarburos que flotarán en la superficie del agua. Los surfactantes presentes en el dispersante reducen ampliamente la tensión superficial aceite/agua que existe entre el hidrocarburo y el agua y esto permite que la turbulencia asociada con un derrame de hidrocarburos y gas debajo de la superficie del mar convierta una mayor proporción de hidrocarburos en pequeñas gotas.

La experiencia obtenida durante la respuesta a la descarga del pozo Macondo asociada con el incidente del Deepwater Horizon frente al Golfo de México en 2010 ha mostrado que la inyección de dispersante bajo la superficie del mar (SSDI, por sus siglas en inglés) puede ser un método eficaz de respuesta ante reventones de hidrocarburos y gas bajo la superficie del mar. Si no se hubiera implementado el uso de dispersantes bajo la superficie del mar, más hidrocarburos habrían logrado llegar a las costas. Hubo grandes problemas para la implementación de una respuesta a un derrame de hidrocarburos a 5100 pies (1550 m) bajo la superficie del mar con un método nunca antes utilizado. Fueron necesarios ingenio y conocimientos considerables para desarrollar la SSDI a una respuesta viable durante la mayor respuesta a un derrame de hidrocarburos jamás emprendida.

La SSDI como respuesta a un derrame bajo la superficie del mar tiene muchas ventajas si se compara con la estrategia de responder ante el hidrocarburo derramado únicamente cuando haya alcanzado la superficie del mar. Por ejemplo, la SSDI:

- trata el hidrocarburo derramado en el punto de descarga;
- requiere de menos dispersante si se compara con el tratamiento de hidrocarburos en la superficie;
- reduce la exposición del personal de respuesta a los riesgos de salud y seguridad que plantean los VOC y los hidrocarburos, y
- se puede realizar de manera continua, día y noche y en prácticamente cualquier condición meteorológica, al contrario de los métodos de respuesta que se utilizan en la superficie del mar.

La dispersión en la columna de agua de los hidrocarburos derramados tiene capacidades y límites, además de posibles beneficios y riesgos, al igual que la consideración de cualquier método de respuesta, debe abordarse mediante la realización de un análisis de beneficio ambiental neto (ABAN). La adición de dispersante provocará que una cantidad mayor de hidrocarburos se transforme en pequeñas gotas que se dispersarán dentro de la columna de agua. La SSDI tiene los siguientes beneficios:

- La dispersión en la columna de agua del hidrocarburo derramado evita o reduce la cantidad de hidrocarburo que alcanza la superficie del mar, donde podría quedar a la deriva y trasladarse a la costa donde podría provocar daños graves a los hábitats costeros sensibles a los hidrocarburos, a la vida silvestre y a los recursos importantes desde el punto de vista socioeconómico.
- La dispersión del hidrocarburo en el agua en la forma de pequeñas gotas permite la colonización rápida de los microorganismos degradadores del petróleo de ocurrencia natural en los medios ambientes marinos. Estos microorganismos degradarán de manera significativa la mayoría de los hidrocarburos en un plazo de días o semanas. El dispersante también será biodegradado.

La SSDI también presenta algunos riesgos potenciales. El aumento de la cantidad y las concentraciones de hidrocarburos dispersados en el agua puede incrementar temporalmente el riesgo de exposición de los organismos marinos al hidrocarburo dispersado. Sin embargo, los niveles elevados de hidrocarburos dispersados en la columna de agua ocurrirán en un reventón de hidrocarburos y gas a una tasa de alto flujo y alta velocidad, incluso si no se utilizan dispersantes bajo la superficie del mar. Todas las partes involucradas deben comprender las ventajas y desventajas que implica el uso de SSDI y, de forma ideal, se debe abordar durante la planificación para contingencias ante derrames de hidrocarburos.

La logística para realizar la SSDI requiere de equipo especial, así como de personal capacitado y apoyo considerables. Serán necesarios varios vehículos submarinos de operación remota (ROV, por sus siglas en inglés) con embarcaciones dedicadas costa afuera y una cadena de suministro logística para el suministro de los dispersantes.

El uso de dispersantes bajo la superficie del mar requiere de monitoreo submarino para evaluar su eficacia, así como el lugar a donde las corrientes predominantes en aguas profundas trasladarán a las columnas de hidrocarburo. Para abordar inquietudes acerca de la posibilidad de efectos tóxicos en los organismos marinos provocados por los hidrocarburos dispersados, puede ser necesario realizar monitoreo adicional del agua y estudios de muestro de agua con el análisis posterior para asegurar de que las concentraciones de hidrocarburos y la extensión de los hidrocarburos no excedan los valores asumidos en el ABAN para el evento. Esto se llevó a cabo durante el incidente del Macondo. Aunque la investigación aún está en marcha, los datos disponibles indican que las preocupaciones acerca de la toxicidad sustancial para los organismos marinos, el agotamiento del oxígeno en el agua debido a la biodegradación y la persistencia de dispersantes en la columna de agua son infundadas y que el uso de dispersantes bajo la superficie del mar ha demostrado ser una herramienta muy eficaz para respuestas a derrames.

El papel del uso de dispersantes en respuestas a derrames de hidrocarburos

La aplicación de dispersantes en la superficie es uno de los varios métodos de respuesta posibles en el mar. La aplicación de dispersantes puede ser una forma útil de minimizar los riesgos a la seguridad en el sitio de un derrame y reducir el daño general provocado por un incidente al eliminar el hidrocarburo de la superficie del mar al transferirlo a la columna de agua, evitando así que alcance hábitats costeros y costas sensibles. La dispersión de los hidrocarburos mejora los procesos de biodegradación natural que descomponen los hidrocarburos. El uso de dispersantes no provoca que el hidrocarburo se hunda hacia el lecho marino

Al igual que todos los métodos de la caja de herramientas para respuestas, el uso de dispersantes tiene algunos límites, pero también capacidades que lo hacen particularmente útil en respuestas a derrames mayores de hidrocarburos en el mar. En esta Guía de buenas prácticas (GBP) de IPIECA-IOGP se aborda el uso de dispersantes para enfrentar derrames de hidrocarburos bajo la superficie del mar; en una GBP de acompañamiento titulada *Dispersantes: aplicación en superficie* (IPIECA-IOGP, 2015) se describe el uso de dispersantes en respuestas a hidrocarburos flotantes.

Durante la descarga de hidrocarburos y gas del pozo Macondo asociada con el incidente del Macondo en 2010, la inyección de dispersante bajo la superficie del mar (SSDI) se utilizó por primera vez para tratar el hidrocarburo con dispersante directamente en la fuente de un evento de reventón a gran escala. Esto constituyó una forma novedosa de aplicar dispersantes y se describe en esta GBP.

El motivo para el uso de SSDI en una descarga de hidrocarburos bajo la superficie del mar es el mismo que para el uso de cualquier dispersante; evitar o minimizar la cantidad de hidrocarburos que se trasladan posteriormente a las aguas poco profundas de la costa o a la costa donde podrían provocar daños graves a los hábitats y especies presentes y alterar las actividades socioeconómicas. Cualquier uso exitoso de dispersantes implica la transferencia de una mayor cantidad de hidrocarburos a la columna de agua que lo que ocurriría de otra forma, es decir:

- el uso de dispersantes sobre hidrocarburos flotantes dispersa el hidrocarburo de la superficie del mar hacia la capa superior de la columna de agua donde puede ser más rápidamente diluido y biodegradado, y
- la SSDI aumenta la proporción de hidrocarburos que son dispersados, diluidos y biodegradados en la columna de agua, comparado con los niveles que se alcanzan en la superficie del mar y que podrían quedar a la deriva y transportarse a la costa.

El uso de dispersantes bajo la superficie del mar es una respuesta a una descarga de hidrocarburos bajo la superficie del mar. Por lo tanto, es conveniente considerar en primer lugar la forma en que el hidrocarburo derramado se puede comportar.

Comportamiento de los hidrocarburos liberados bajo la superficie del mar

Los hidrocarburos se pueden liberar bajo la superficie del mar en diversas formas, entre las cuales se incluyen las siguientes:

- reventones bajo la superficie del mar, por ejemplo, en los incidentes del Macondo en 2010, y del Ixtoc 1 en 1979 (Farringdon, 1980);
- fisuras en el lecho marino, por ejemplo, la infiltración del campo Frade en la Cuenca de Campos en Brasil en 2012 (Chevron, 2012) y otras infiltraciones naturales que se extienden a los océanos de todo el mundo;
- fugas o roturas de las líneas de flujo bajo la superficie del mar (las tuberías que conectan los pozos submarinos con las instalaciones en tierra);
- fugas o roturas en oleoductos submarinos para exportación de hidrocarburos, y
- descargas de combustible o tanque de carga de embarcaciones hundidas.

El comportamiento de los hidrocarburos liberados será determinado por:

- las características de la descarga, es decir, la presión y las tasas de flujo de los hidrocarburos y el gas, la relación gas-aceite (GOR, por sus siglas en inglés), y el tamaño y la geometría de la descarga.
- las condiciones del agua en la que se descarga el hidrocarburo, es decir, la profundidad del agua (por lo tanto, la presión hidrostática), la temperatura, las corrientes y las condiciones oceanográficas en el sitio de la descarga, y
- las propiedades del hidrocarburo derramado; en la mayoría de los casos, el hidrocarburo derramado en un reventón bajo la superficie del mar se encuentra a altas temperaturas, pero se enfría rápidamente cuando entra en contacto con el agua fría profunda. La densidad, la viscosidad y el punto de escurrimiento del hidrocarburo, y la forma en que estas propiedades del hidrocarburo cambian con el tiempo, influyen en el comportamiento del hidrocarburo liberado.

La principal característica del hidrocarburo liberado bajo la superficie del mar que afecta su comportamiento posterior es el tamaño, o la distribución del tamaño, de las gotas de hidrocarburo que se producen.

- Las descargas de hidrocarburos a alta presión y alta velocidad, especialmente en presencia de una fase de gas, produce pequeñas gotas de hidrocarburos y burbujas de gas en el agua. El comportamiento posterior del hidrocarburo y el gas dependerá de la profundidad del agua.
- Las descargas lentas a baja presión sin presencia de gas permiten que el hidrocarburo ingrese al agua en forma de glóbulos grandes.

La velocidad a la que una gota de hidrocarburo ascenderá a través del agua estática (salinidad de 32 partes por mil, es decir, densidad de 1,024 g/ml) depende de la densidad y el tamaño de la gota de hidrocarburo.

Tabla 1 Diámetro de la gota de hidrocarburo y tiempo de ascenso a través de agua salina estática

Diámetro de gota de hidrocarburo (densidad del hidrocarburo = 0,85)	Tiempo de elevación a 1 m	Tiempo de elevación a 1500 m
4 mm (4 000 μm)	de 3 a 5 segundos	de 1 a 2 horas
3 mm (3 000 μm)	de 5 a 10 segundos	de 2 a 4 horas
2 mm (2 000 μm)	alrededor de 15 segundos	alrededor de 6 horas
1 mm (1 000 μm)	alrededor de 20 segundos	alrededor de 8 horas
0,4 mm (400 μm)	85 segundos	35 horas
0,2 mm (200 μm)	5 minutos	5 días
0,1 mm (100 μm)	19 minutos	Se biodegrada antes de elevarse a esta distancia
0,05 mm (50 μm)	1,3 horas	Se biodegrada antes de elevarse a esta distancia
0,02 mm (20 μm)	8 horas	Se biodegrada antes de elevarse a esta distancia
0,01 mm (10 μm)	31 horas	Se biodegrada antes de elevarse a esta distancia

Abajo: infiltración natural de baja presión frente a la costa de California



USGS

Nota: las gotas de hidrocarburo con diámetro mayor a 0,4 mm se deforman a partir de una forma esférica durante un ascenso rápido a través del agua; y las estimaciones de tiempos se vuelven menos exactas.

Casi todos los hidrocarburos crudos son menos densos que el agua salina por lo que tienden a flotar, pero las gotas grandes de hidrocarburo flotan hacia la superficie del mar mucho más rápidamente que las pequeñas (consulte la Tabla 1 en la página 7. Las gotas pequeñas de hidrocarburos de una descarga de hidrocarburos en aguas profundas se biodegradan antes de poder alcanzar la superficie del mar, de la manera indicada. La biodegradación también dará como resultado que las gotas pequeñas también disminuyan su velocidad a medida que se reducen en tamaño a través de este proceso; este factor no se incluye en estos tiempos de estimación.

Reventón bajo la superficie del mar

Se han realizado estudios teóricos de lo que podría ocurrir a los hidrocarburos derramados en reventones bajo la superficie del mar en aguas profundas, pero solo se ha realizado un estudio a gran escala para confirmar o modificar las consideraciones teóricas. Este fue el experimento DeepSpill realizado en el mar de Noruega en 2000 en aguas de 844 m (2770 pies) a aproximadamente 125 km de la costa de Noruega central (Johansen *et al.*, 2001 y Johansen *et al.*, 2003). Se hicieron cuatro descargas controladas de hidrocarburo y gas, para un total de 120 m³ (755 barriles) de hidrocarburos y 10.000 m³ estándar de gas natural. Este experimento únicamente estudió hidrocarburos no tratados y no se utilizó ningún dispersante. Se hicieron extensas observaciones de vientos, corrientes, densidad del agua, concentraciones de hidrocarburos en superficie y subsuperficie y muestras químicas y biológicas en la columna de agua. El hidrocarburo empezó a llegar a la superficie alrededor de una hora después del inicio del derrame y dentro de algunos cientos de metros del sitio del derrame. El hidrocarburo continuó emergiendo a la superficie durante varias horas después de que el derrame terminó. No se formaron hidratos de gas. Ninguna burbuja de gas alcanzó la superficie del mar, lo que indica que el gas se había disuelto en el agua. Las ecosondas a bordo de las embarcaciones de investigación pudieron rastrear la columna de hidrocarburo/gas a medida que se elevaba a través de la columna de agua.

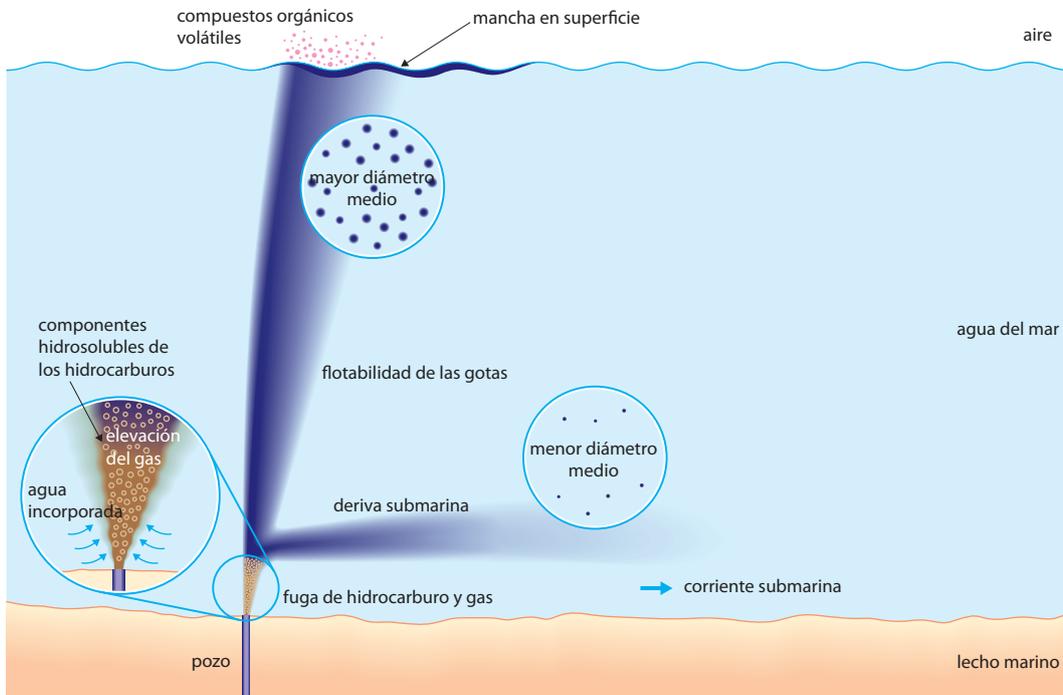
Las conclusiones del experimento de campo DeepSpill, de otros dos estudios de seguimiento en laboratorio y tres comparaciones de modelos se resumen en un informe de 2005 titulado *Review of Deep Oil Spill Modeling Activity Supported by the DeepSpill JIP and Offshore Operators Committee* (Adams y Socolofsky, 2005). Este informe indicó lo siguiente:

- Los chorros a alta velocidad de hidrocarburos y gas metano descargados bajo la superficie del mar en aguas profundas se descomponen por la turbulencia intensa de las condiciones de la descarga en pequeñas gotas de hidrocarburo y burbujas de gas. Este fenómeno con frecuencia se conoce como hidrocarburo dispersado “mecánicamente” para diferenciarlo del hidrocarburo dispersado por el uso de dispersantes.
- La columna de pequeñas gotas de hidrocarburos, burbujas de gas y agua incorporada subirá rápidamente al inicio en la forma de una columna flotante, siendo el gas el elemento que ofrece la fuente principal del ascenso y la flotabilidad. Cerca del punto de derrame, esta columna se comportará como una columna de una sola fase.
- A medida que la columna de gotas de hidrocarburo y burbujas de gas sube a través del agua profunda (más de 500 m de profundidad), el gas metano se disuelve en el mar (debido a su solubilidad a alta presión); esto reduce la flotabilidad de la columna, reduciendo así su ascenso a través del agua.
- A continuación, la estratificación en la columna de agua y las corrientes separa las gotas de hidrocarburo y las burbujas de gas (si es que aún no se han disuelto) de la columna del agua incorporada.
- Las gotas más grandes de hidrocarburo continuarán subiendo lentamente a la superficie del mar bajo su propia flotabilidad, la cual está en función de su tamaño, mientras que las gotas más pequeñas de hidrocarburo serán transportadas horizontalmente y permanecerán suspendidas en la columna de agua a medida que se diluyen y se biodegradan.

Estos procesos se representan esquemáticamente en la Figura 1 de la página 9.

No todo el hidrocarburo que se libera del reventón bajo la superficie del mar en aguas profundas alcanza la superficie del mar. La turbulencia provocada por el chorro de alta velocidad y alta tasa de flujo de la descarga de hidrocarburos y gas convierte una proporción del hidrocarburo en pequeñas gotas que son lo

Figura 1 Representación esquemática de una descarga bajo la superficie del mar (no a escala)

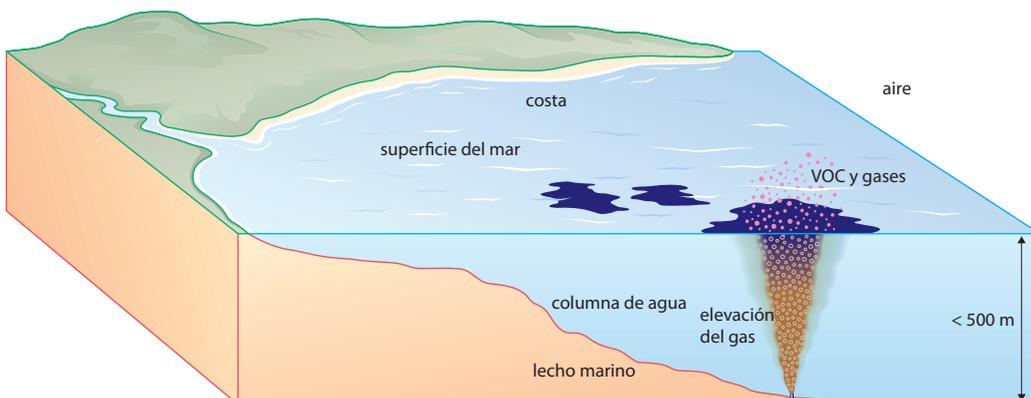


En la Figura 1 se representa el proceso que ocurrió en los experimentos DeepSpill y en el incidente del Macondo en 2010 (no a escala). La columna de las gotas más grandes de hidrocarburo que suben hasta la superficie del mar y la columna de las gotas más pequeñas de hidrocarburo dispersado que se estratifican horizontalmente y permanecen en la columna de agua se muestran en color en el diagrama únicamente para fines explicativos. Las columnas de hidrocarburos dispersados en la columna de agua no son visibles; para detectarlas se requiere interpretación sensible ya que el hidrocarburo dispersado se diluye en la columna de agua.

suficientemente pequeñas para dispersarse en la columna de agua por las corrientes predominantes en la columna de agua estratificada. La proporción de hidrocarburo que se dispersa por la turbulencia de la descarga depende de las circunstancias precisas de la descarga.

En las descargas de hidrocarburos y gas provenientes de reventones bajo la superficie del mar en aguas con profundidad menor a los 500 m (ver Figura 2), es probable que el gas no se disuelva totalmente entre el agua. En reventones de hidrocarburos y gas en aguas menos profundas, la columna flotante de burbujas de gas es probable que llegue rápidamente a la superficie del mar donde el gas escapa al aire (con la posibilidad de un

Figura 2 Representación esquemática de un reventón de hidrocarburo y gas en aguas someras donde la mayoría del gas liberado alcanza la superficie (no a escala)



El reventón del Ixtoc I en México en 1979, en aguas con profundidad menor a 100 m.



NOAA

peligro de incendio/explosión), y el hidrocarburo se dispersará inicialmente de manera radial sobre la superficie del mar. El hidrocarburo llevado a la superficie estará sujeto a los típicos procesos de envejecimiento, incluido el movimiento impulsado por el viento y por la corriente de la superficie, la evaporación, la fragmentación y la posible emulsificación.

Otras descargas bajo de la superficie del mar

Se deben considerar las circunstancias de cada descarga de hidrocarburos bajo la superficie del mar al evaluar el resultado probable. Están disponibles varios modelos informáticos para predecir el posible comportamiento de los hidrocarburos.

- Una descarga a través de un orificio muy pequeño en una línea de flujo que transporta hidrocarburos y gas dará como resultado un chorro fino de pequeñas gotas de hidrocarburo que entran al agua, pero el volumen del hidrocarburo derramado será bajo. La ruptura de una línea de flujo dará como resultado una descarga inicial rápida de hidrocarburos y gas, pero esta cesará a medida que la línea de flujo sea aislada y la línea despresurizada.
- La ruptura de un oleoducto bajo la superficie del mar para la exportación de hidrocarburos después de que el gas se ha eliminado mediante procesamiento en tierra producirá un desplazamiento inicial rápido del hidrocarburo en el agua, seguido de una descarga mucho más lenta de hidrocarburo a medida que el oleoducto roto se llena de agua. Es probable que el hidrocarburo se eleve en forma de glóbulos grandes.
- Las descargas de embarcaciones hundidas dependerán de las circunstancias, pero es probable que sean lentas y produzcan glóbulos grandes de la carga de combustible o hidrocarburos.

El uso de SSDI para las situaciones de descargas anteriores no es probable que sea viable ni adecuado.

Posibles consecuencias de los hidrocarburos liberados bajo la superficie del mar

Como se describió en la sección anterior, es probable que los hidrocarburos descargados de un reventón bajo la superficie del mar entren a la columna de agua en la forma de gotas de hidrocarburo de una variedad de tamaños. Las gotas grandes de hidrocarburo se elevan relativamente rápido mientras que las pequeñas lo hacen mucho más lento y algunas no alcanzan la superficie del agua, dispersándose, diluyéndose rápidamente y posteriormente biodegradándose en la columna del agua.

Potencial de efectos en la columna de agua

Hay un riesgo potencial a los organismos marinos en la columna de agua que son expuestos a las gotas de hidrocarburos dispersados y a cualquier compuesto que se pueda disolver y descargar de las gotas de hidrocarburos. El daño que estas exposiciones pueden causar al organismo depende de muchos factores, incluida la composición química del hidrocarburo, la concentración de las gotas y los compuestos disueltos a los que el organismo puede estar expuestos, la duración de la exposición y la sensibilidad de la especie. Los peces adultos pueden detectar compuestos de hidrocarburos en el agua y tienen la capacidad de alejarse de las zonas con mayores concentraciones de hidrocarburos en los alrededores de una descarga, mientras que el plancton está a la deriva en las corrientes y no puede evitar la exposición a los compuestos de los hidrocarburos.



Shutterstock.com



Wellcome Images

Los peces adultos (extremo izquierdo) pueden detectar los compuestos de hidrocarburos en el agua y probablemente se alejen de la zona contaminada; mientras que el plancton (izquierda) está a la deriva en las corrientes y no puede evitar la exposición a los hidrocarburos.

Potencial de efectos en la superficie del mar

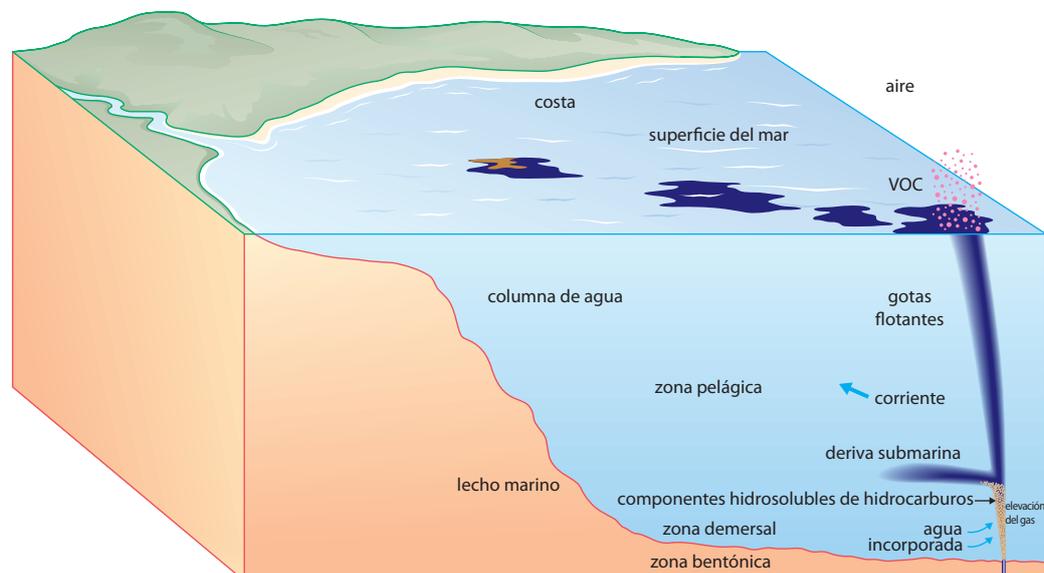
Los hidrocarburos derramados que se elevan hacia la superficie del mar se distribuyen y forman manchas de hidrocarburos en los alrededores del derrame. Algunas porciones de los componentes más volátiles del hidrocarburo (benceno, tolueno, etilbenceno y los xilenos (BTEX), a menudo llamados en conjunto compuestos orgánicos volátiles o VOC), se pueden disolver en la columna de agua; la cantidad de la disolución depende de la profundidad a la cual el hidrocarburo es derramado, así como de otros factores (como el uso de SSDI). Los VOC que alcanzan la superficie del mar se evaporan del hidrocarburo y se incorporan al aire. En un plan de contingencia para derrames de hidrocarburos, se deben tomar en cuenta si esto representa una preocupación para la salud y la seguridad del personal de respuesta.

Los hidrocarburos flotantes quedarán a la deriva bajo la influencia de los vientos y corrientes predominantes. Los hidrocarburos a la deriva en la superficie del mar pueden plantear un riesgo para la vida silvestre como las aves marinas que se posan o nadan a través del hidrocarburo, y las tortugas y mamíferos marinos que atraviesan el hidrocarburo superficial para respirar. Dependerá de muchos factores que estas exposiciones produzcan daños, incluida la composición química y la concentración del hidrocarburo, la duración y el método de exposición y la sensibilidad de la especie. Los efectos potenciales pueden incluir irritación, hipotermia y efectos tóxicos subletales y letales.

Los recursos ecológicos más sensibles a los hidrocarburos son más frecuentemente los que se encuentran en las aguas costeras o en las costas. Estas áreas costeras son también las zonas de reproducción para muchas especies de peces e invertebrados, así como las zonas de anidación para las aves. Los hidrocarburos a la deriva dirigiéndose a la costa pueden entrar en contacto con estos recursos ecológicos y además alterar importantes actividades socioeconómicas de las costas.

Los hidrocarburos derramados en el mar tienen el potencial de producir efectos negativos sobre una variedad de recursos ecológicos y socioeconómicos, en función del compartimiento medioambiental. Estos se resumen en la Figura 3 (abajo) y en la Tabla 2 (página 13). Se ofrece información adicional en la Guía de buenas prácticas de IPIECA-IOGP acerca de la ecología marina (IPIECA-IOGP, 2015a) y en las costas (IPIECA-IOGP, 2016).

Figura 3 Representación esquemática de los compartimientos medioambientales en relación con una descarga bajo la superficie del mar en aguas profundas



Nota: Las columnas de hidrocarburos dispersados en la columna de agua no son visibles; para detectarlas se requiere interpretación sensible ya que el hidrocarburo dispersado se diluye en la columna de agua. La emulsificación potencial de los hidrocarburos flotantes se indica por el cambio a un color marrón/naranja.

Tabla 2 Efectos potenciales de los hidrocarburos sobre los compartimientos medioambientales.

Compartimiento medioambiental		Efectos potenciales del hidrocarburo	
Zona bentónica del lecho marino		Las descargas bajo la superficie del mar de hidrocarburos flotarán a la superficie o formarán parte de las columnas submarinas que se diluyen y biodegradan a medida que se alejan de la fuente de la descarga. La mayor parte de los hidrocarburos presentes en el agua en forma de pequeñas gotas se biodegradará en el transcurso de días o semanas. Los compuestos de los hidrocarburos que son más lentos para biodegradarse son similares a los que se encuentran en el bitumen o asfalto, y son principalmente inertes biológicamente y de baja toxicidad. La proporción de un hidrocarburo crudo presente en la forma de estos compuestos es generalmente pequeña y este residuo estará presente a muy bajas concentraciones de unas pocas ppb (partes por cada mil millones) en el agua como remanentes de las gotas de hidrocarburos dispersadas biodegradadas. Algunos de estos compuestos pueden finalmente depositarse en el lecho marino a concentraciones extremadamente bajas sobre una gran superficie, sin plantear riesgos a la vida marina.	
Columna de agua	Zona demersal cercana al lecho marino		
	Agua pelágica profunda		Las aguas profundas del océano contienen una densidad relativamente baja de vida biológica comparada con el agua más cercana a la superficie. Sin embargo, los animales que viven en las aguas profundas abiertas pueden estar expuestos a columnas de hidrocarburo dispersado y la exposición puede incrementarse con el uso de dispersantes. Las concentraciones potencialmente peligrosas probablemente se limitarán a un radio de unos cuantos kilómetros del sitio de la descarga. Los peces de nado libre posiblemente detecten y eviten las zonas con concentraciones relativamente altas de hidrocarburos.
	Cerca de la costa		Los hábitats de aguas someras cerca de la costa como los arrecifes de coral pueden ser susceptibles a daños por exposición a los hidrocarburos dispersados de manera natural o propiciada por medio del uso de dispersantes. Los arrecifes a profundidad mayor a los 10 metros corren poco riesgo de concentraciones peligrosas de hidrocarburos debido al potencial de dilución.
Superficie del mar		Los hidrocarburos derramados flotantes en la superficie del mar plantean riesgos a los recursos ecológicos como las aves marinas, los mamíferos marinos y los huevos/larvas de peces que están presentes en la parte superior de la columna de agua. El plumaje de las aves marinas que se posan o que nadan a través del hidrocarburo se impregnarán con este. Esto reduce las propiedades aislantes del plumaje y puede producir la muerte por hipotermia. Los hidrocarburos flotantes pueden perdurar hasta que sean eliminados por el personal de respuesta ante derrames de hidrocarburos o por los procesos de meteorización.	
Sedimentos cerca de la costa		Las gotas de hidrocarburo dispersadas de manera natural que se incorporan a los sedimentos cerca de la costa continuarán estando sujetas a los procesos de meteorización como la biodegradación. Sin embargo, este hidrocarburo puede ocasionar exposición a largo plazo a los organismos que habitan el fango y el sedimento.	
Costa		El hidrocarburo derramado en la superficie del mar puede quedar a la deriva hacia aguas poco profundas y contaminar los hábitats costeros incluidos los bajos de fango y los humedales sensibles a los hidrocarburos. Las fotografías o videos de aves marinas sufriendo o moribundas cubiertas de hidrocarburos que son llevadas a la costa son imágenes espantosas de los efectos de derrames de hidrocarburos en el pasado. Los hidrocarburos derramados pueden sofocar organismos costeros. Los hidrocarburos en los sustratos costeros continuarán estando sujetos a los procesos de envejecimiento y biodegradación, pero a una tasa mucho menor que la que ocurre con los hidrocarburos dispersados, y pueden ser una fuente de exposición a largo plazo para los organismos costeros. La posibilidad de que estas exposiciones tengan efectos tóxicos depende de una variedad de factores, incluida la composición química y la concentración del hidrocarburo.	
Socioeconómico		Los hidrocarburos en la superficie del mar pueden ensuciar embarcaciones pesqueras y sus equipos, y los gobiernos pueden prohibir la pesca en aguas contaminadas por hidrocarburos, afectando potencialmente a las empresas y las personas que pescan en esa zona. Los hidrocarburos en la superficie del mar pueden evitar o alterar las actividades recreativas acuáticas. Los hidrocarburos derramados a la deriva hacia una playa turística también pueden producir el cierre de las playas y tener un impacto importante en el ingreso de quienes dependen del turismo. Las características económicas costeras como las tomas de agua salina o los puertos y muelles también pueden interrumpirse por los hidrocarburos que son arrastrados a la costa.	

Respuesta a descargas bajo la superficie del mar

La implementación de cualquier método de la caja de herramientas de respuesta a derrames de hidrocarburos debe tener como objetivo minimizar el daño que podría producirse por el hidrocarburo derramado en caso de no adoptarse ninguna medida. La principal amenaza ecológica del hidrocarburo flotante se considera que es cuando el hidrocarburo entra en la costa o toca tierra. Los medios ambientes costeros generalmente tienen mayor abundancia biológica y a menudo son más sensibles a los hidrocarburos que los medios ambientes de aguas abiertas. Evitar que los hidrocarburos lleguen a tierra es a menudo la clave para minimizar los impactos al medio ambiente de un derrame de hidrocarburos costa afuera.

La respuesta a derrames de hidrocarburos bajo la superficie del mar podría realizarse:

- **en la fuente:** el control de la fuente tiene como objetivo detener o evitar que el hidrocarburo derramado alcance la superficie del mar, ya sea mediante contención bajo la superficie del mar (con transferencia a una embarcación de recuperación en la superficie) o al mejorar la dispersión del hidrocarburo, y/o
- **en la superficie del mar:** después de que el hidrocarburo derramado bajo la superficie del mar ha ascendido a la superficie, donde el objetivo principal de la respuesta es evitar que el hidrocarburo se traslade a la deriva hacia la costa.

Una ventaja de realizar una respuesta bajo la superficie del mar es que las operaciones se pueden llevar a cabo en un lugar conocido y fijo, en comparación con el hidrocarburo flotante en la superficie del mar que en algunos casos puede aparecer como manchas fragmentadas distribuidas en una amplia zona de la superficie del mar y a la deriva bajo la influencia de los vientos y corrientes predominantes.

Respuesta bajo la superficie del mar

Control de la fuente

El principal foco de una respuesta en dichos incidentes siempre será detener el derrame del hidrocarburo bajo la superficie del mar. En el caso de fugas o rupturas de líneas de flujo bajo la superficie del mar o de oleoductos para la exportación de hidrocarburos, es posible que existan controles de ingeniería que puedan cerrar rápidamente el oleoducto o aislar la sección que se haya dañado. Un desafío mucho mayor es detener el flujo de un reventón bajo la superficie del mar donde haya fallado un preventor de reventones (BOP, por sus siglas en inglés). La perforación de pozos de alivio para interceptar y desviar el flujo de hidrocarburos mucho más abajo del cabezal del pozo en el lecho marino será eficaz, pero su realización puede demorar semanas. En los últimos años se han desarrollado dispositivos de sello de implementación rápida para sellar pozos de petróleo en el improbable caso de que fallen todas las barreras de seguridad, incluido el BOP. La Marine Well Containment Company (MWCC), El Subsea Well Intervention Service (SWIS) y otros proveedores tienen actualmente dispositivos de sello que se pueden implementar rápidamente en todas las regiones de exploración, desarrollo y producción.

Contención y recuperación bajo la superficie del mar

La recuperación de parte o de todo el hidrocarburo de una descarga bajo la superficie del mar puede ser posible por la implementación de varios dispositivos de contención y recuperación de hidrocarburos bajo la superficie del mar. Después de la descarga del pozo Macondo y otros incidentes, el Subsea Well Response Project (SWRP) de la industria del petróleo, MWCC y el Helix Well Containment Group han desarrollado conjuntos de herramientas de equipos de contención y directrices de contención para pozos bajo la superficie del mar. Actualmente están disponibles equipos y servicios internacionales para la contención y la recuperación bajo la superficie del mar a través de SWIS y otros proveedores. El concepto de contención depende de las plataformas de perforación y del equipo para pruebas de pozos disponible comercialmente para capturar fluidos de un pozo de incidente y conducirlos a la superficie para procesamiento y eliminación. Si el cierre del pozo no es posible, el conjunto de herramientas para la contención de pozos bajo la superficie

del mar se puede implementar para permitir el flujo de los hidrocarburos del pozo desde el dispositivo de sello hasta un tanque de descarga.

Inyección de dispersante bajo la superficie del mar

La inyección de dispersante bajo la superficie del mar (SSDI) puede evitar o reducir la cantidad de hidrocarburos que alcanzan la superficie del mar y posteriormente quedar a la deriva hacia la costa. Se ofrece información adicional en las secciones posteriores.

Respuesta a hidrocarburos flotantes

Los métodos de respuesta disponibles para descargas de hidrocarburos bajo la superficie del mar que alcanzan la superficie y para descargas que se originan en la superficie del agua son idénticos y bien establecidos e incluyen:

- **contención y recuperación en el mar** de hidrocarburos derramados con barreras flotantes (booms) y dispositivos de recuperación (skimmers); el producto recuperado se recolecta en los tanques de una embarcación u otras instalaciones de almacenamiento para la carga posterior y procesamiento o eliminación;
- **quema controlada in situ**: se reúnen los hidrocarburos en barreras resistentes al fuego y se incineran. La quema in situ elimina el hidrocarburo flotante al convertirlo en productos de combustión que se incorporan al aire (principalmente en la forma de bióxido de carbono y vapor de agua con pequeñas cantidades de hollín y otros gases) que se diluyen rápidamente en la atmósfera, y
- **uso de dispersantes**: dispersa el hidrocarburo flotante en la capa superior de la columna de agua como pequeñas gotas, las cuales se diluyen rápidamente a bajas concentraciones en el agua. La mayoría del hidrocarburo en estas gotas será posteriormente biodegradado por los organismos degradadores de hidrocarburos. El destino final de la mayoría de los hidrocarburos es convertirse biológicamente en dióxido de carbono y agua.

Cada una de estas opciones tiene capacidades y límites que la hacen más o menos adecuada para una respuesta en condiciones específicas (ver Tabla 3).

Tabla 3 Características operativas clave de los métodos de respuesta primarios en el mar (note que las operaciones en superficie se restringen ampliamente a las horas de luz diurna)

Factor	Contención y recuperación	Quema controlada (in situ)	Uso de dispersantes
Tasa a la cual se puede encontrar el hidrocarburo derramado	Baja	Baja	Alta
Tasa de eliminación de hidrocarburos derramados	Baja	Alta durante la quema	Alta
Condiciones predominantes limitantes	Es posible hasta velocidades del viento de 20 nudos y altura de las olas de 2,5 metros	Es posible hasta velocidades del viento de 10 nudos y altura de las olas de <1 metro	Es posible hasta velocidades del viento de 35 nudos y altura de las olas de 5 metros
Tipo de hidrocarburo y propiedades	Es necesario que el skimmer coincida con la viscosidad cambiante	Los hidrocarburos que han perdido las fracciones más ligeras y los hidrocarburos emulsificados son difíciles de incinerar	Los hidrocarburos de alta viscosidad pueden ser difíciles de dispersar, además del posible límite por el punto de escurrimiento

Los dispersantes y su funcionamiento

Composición de los dispersantes modernos

Los dispersantes modernos son mezclas de surfactantes en solventes.

Surfactantes

Los surfactantes son sustancias tensoactivas con varias aplicaciones domésticas e industriales. Las moléculas de los surfactantes tienen dos partes unidas: una parte hidrófila (afín al agua) conectada con una parte lipófila (afín al hidrocarburo). Se pueden clasificar los surfactantes en varios grupos como los aniónicos (con una parte hidrófila cargada negativamente), no iónicos (con una parte hidrófila no cargada), catiónicos (con una parte hidrófila cargada positivamente) o anfóteros (que combinan cationes y aniones en la misma molécula). Hay miles de surfactantes disponibles comercialmente. Son los ingredientes activos de muchos productos domésticos como jabones, champús, aditivos para alimentos, cosméticos, limpiadores y detergentes. Ningún surfactante está fabricado específicamente para usarse en dispersantes.

La función de los surfactantes en la mayoría de las aplicaciones es reducir la tensión interfacial (IFT, por sus siglas en inglés) entre dos fluidos. Los surfactantes que se usan en los limpiadores comunes reducen la tensión superficial del agua (también conocida como tensión interfacial aire/agua o IFT) de forma que el agua pueda mojar con mayor eficacia las fibras y superficies que se deben limpiar. Sueltan y encapsulan la suciedad, lo que garantiza que la suciedad no se volverá a depositar en las superficies.

Los surfactantes que se usan en los dispersantes reducen la IFT hidrocarburo/agua al orientarse en la interfaz hidrocarburo/agua. La parte lipófila de la molécula del surfactante está en el hidrocarburo y la parte hidrófila, en el agua. El surfactante forma un "puente" entre el hidrocarburo y el agua. La interfaz entre el hidrocarburo y el agua es entonces ocupada por los surfactantes y esto reduce la IFT hidrocarburo/agua en alrededor de 30 veces si se usan dispersantes modernos bien formulados. Esta reducción en la IFT hidrocarburo/agua permite que las olas u otras fuentes de energía rompan el hidrocarburo en pequeñas gotas y las dispersen en el agua. Además, las gotas se rodean de surfactante evitando que se peguen entre sí o que formen gotas de mayor tamaño que pueden surgir a la superficie con mayor facilidad.

Disolventes

Los disolventes usados en los dispersantes modernos incluyen los éteres del glicol, hidrocarburos y agua (Fiocco *et al.*, 1995). Es necesario un disolvente para producir un dispersante líquido que pueda rociarse fácilmente. Muchos surfactantes son líquidos y/o sólidos de alta viscosidad, por lo que necesitan mezclarse en un disolvente para producir un dispersante de viscosidad relativamente baja. Los disolventes también permiten que el dispersante sea flotante y ayuda al surfactante a penetrar el hidrocarburo derramado.

Las mezclas o formulaciones precisas de la mayoría de los dispersantes son información patentada. Sin embargo, los detalles de la formulación se pueden compartir, en confianza, con los reguladores locales como parte del listado del dispersante o el proceso de aprobación. La mayoría de los dispersantes consisten en una mezcla de dos o tres surfactantes no iónicos (Brochu *et al.*, 1986) y en ocasiones incluyen un surfactante aniónico (Brandvik y Daling, 1998). Todos los surfactantes que se utilizan en los dispersantes también se utilizan en muchos otros productos de uso doméstico.

La lista de ingredientes de los ampliamente almacenados dispersantes COREXIT® ha sido publicada por su fabricante, como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4 Lista de ingredientes de los ampliamente acopiados dispersantes COREXIT®, de la forma publicada por el fabricante

Número de servicio de resúmenes químicos	Nombre	Nombre genérico	Ejemplos de uso comunes, cotidianos
1338-43-8	Sorbitán, mono- (9Z) -9-octadecenoato	Span	Crema para la piel, champú corporal, emulsificante en jugos
9005-65-6	Sorbitán, mono- (9Z) -9-octadecenoato, derivados de poli (oxi-1, 2-etanodiol)	Tween	Baño para bebé, enjuague bucal, loción facial, emulsificante en alimentos
9005-70-3	Sorbitán, tri- (9Z) -9-octadecenoato, derivados de poli (oxi-1, 2-etanodiol)	Tween	Loción corporal/facial, lociones de bronceado
577-11-7	Ácido butanodioico, éster 2-sulfo, 1,4-bis (2-etilhexil), sal de sodio (1: 1) [contiene 2-propanodiol]	DOSS	Agente humectante en productos cosméticos, gelatina, bebidas
29911-28-2	Propanol, 1- (metiloxi 2-butoxi-1-)	Disolvente de éter de glicol	Productos de limpieza domésticos
64742-47-8	Destilados (hidrocarburos), ligeros hidrotratados	Disolvente de hidrocarburo	Refrescante de aire, limpiador
111-76-2	El etanol, 2-butoxi [NO se incluye en la composición de COREXIT® 9500]	Disolvente de éter de glicol	Limpiadores

Algunos de los surfactantes no iónicos más ampliamente usados tienen una parte hidrófila basada en el sorbitán (un azúcar derivado del sorbitol) y una parte lipófila basada en un ácido graso (un hidrocarburo vegetal) (Al-Sabagh *et al.*, 2007). Estos surfactantes no iónicos tienen el nombre comercial genérico de "Spans". Otros surfactantes no iónicos usados son generalmente conocidos como "Tweens", y estos son esteres de sorbitán etoxilado. Los spans y los tweens tienen aplicaciones en las industrias farmacéuticas, cosmética, alimentaria y agroquímica. El surfactante aniónico usado en muchos dispersantes modernos es el diiso-octil sulfosuccinato de sodio (en ocasiones conocido como DOSS). Este surfactante es también usado en muchos productos domésticos como limpiadores de varios tipos. Sus propiedades de retención de agua pueden ser útiles y se incluyen en tratamientos para ciertas afecciones de la salud humana.

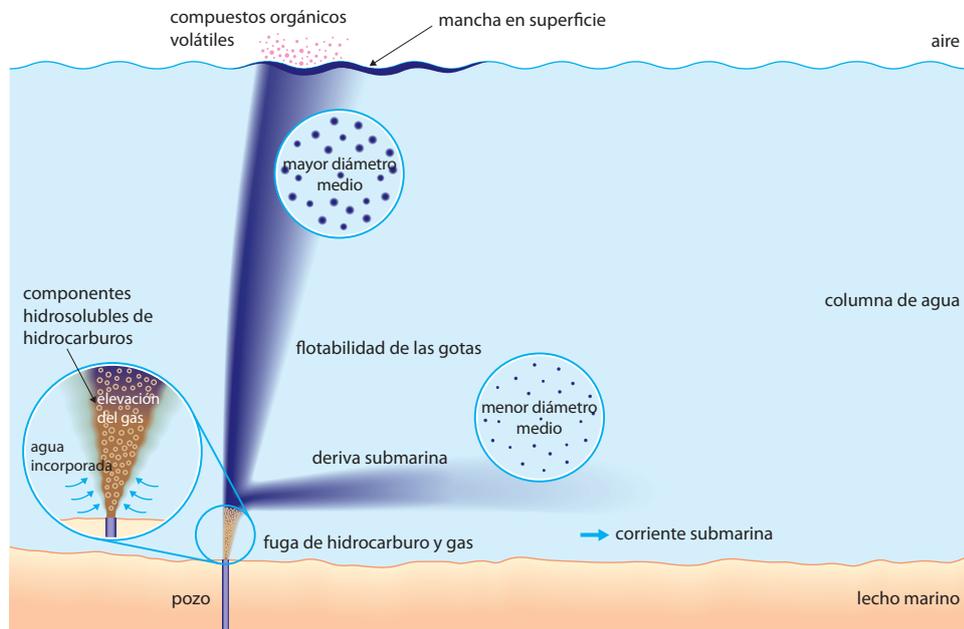
Mecanismo de acción de los dispersantes bajo la superficie del mar

Cuando se agregan a los hidrocarburos, los dispersantes reducen ampliamente la IFT existente entre el hidrocarburo y el agua. Los surfactantes presentes en los dispersantes tienden un puente entre las diferencias inherentes del hidrocarburo y el agua. Esto permite que la energía de mezclado predominante produzca una proporción mucho mayor de pequeñas gotas de hidrocarburos cuando se agrega dispersante que cuando no se hace. Cuando se utiliza dispersante en hidrocarburos flotantes, la energía de mezclado predominante será el oleaje (IPIECA-IOGP, 2015).

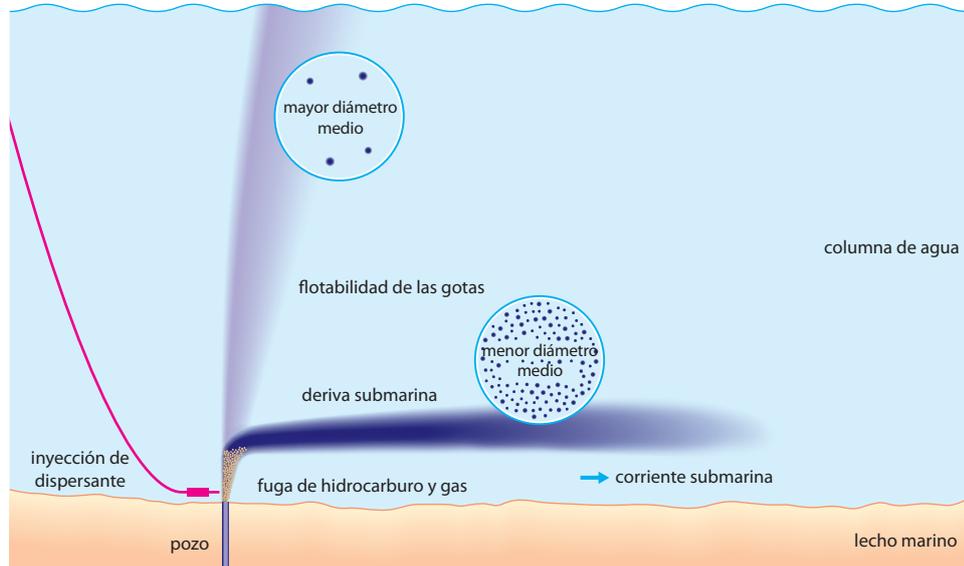
Cuando se utiliza dispersante bajo la superficie del mar en un reventón, la energía de mezclado predominante es la turbulencia producida en el punto de descarga del hidrocarburo y el gas. Si la descarga de hidrocarburos es a alta presión y alta velocidad, especialmente en presencia de una fase de gas, producirá pequeñas gotas de hidrocarburo y burbujas de gas en el agua. Incluso sin la aplicación de dispersante, una proporción del hidrocarburo liberado será en forma de gotas que son demasiado pequeñas para flotar hacia la superficie del mar y, en algunas circunstancias, esta porción puede ya ser sustancial.

Figura 4 Representación esquemática de descarga bajo la superficie del mar con y sin la adición de dispersante (no a escala)

a) Sin dispersante



b) Con dispersante



Nota: Las columnas de hidrocarburos dispersados en la columna de agua no son visibles; para detectarlas se requiere interpretación sensible ya que el hidrocarburo dispersado se diluye en la columna de agua.

El dispersante que se agrega bajo la superficie del mar a la descarga de hidrocarburos provocará una gran reducción en la IFT y la turbulencia de las condiciones de la descarga convertirán una mayor proporción del hidrocarburo en gotas que son lo suficientemente pequeñas para dispersarse en la columna de agua por las condiciones oceanográficas predominantes.

Beneficios y riesgos potenciales del uso de dispersantes bajo la superficie del mar

El motivo para el uso de SSDI en un reventón bajo la superficie del mar es el mismo que para el uso de cualquier dispersante; evitar o minimizar la cantidad de hidrocarburos que se trasladan posteriormente a las aguas poco profundas de la costa o a la costa donde podrían provocar daños a los hábitats costeros con biodiversidad y abundancia relativamente altas, así como alterar las actividades socioeconómicas. La SSDI también proporciona un gran beneficio a la salud y la seguridad al reducir ampliamente la exposición a los compuestos orgánicos volátiles (VOC) del personal de respuesta que se encuentra cerca del sitio de la descarga.

Ejemplos del uso de dispersantes

Entre los beneficios del uso de dispersantes se incluyen los siguientes:

- Minimiza los daños potenciales y la interrupción de la vida silvestre, los hábitats costeros y las características socioeconómicas que podrían ocurrir si el dispersante no se usara y el hidrocarburo permaneciera en la superficie o alcanzara las aguas costeras y el litoral.
- Incrementa la disponibilidad del hidrocarburo para su biodegradación y de este modo acelera su descomposición natural y asimilación en el medio ambiente.
- Puede reducir los vapores potencialmente peligrosos en la vecindad de un derrame y ofrece un beneficio de seguridad al personal de respuesta en la zona inmediata, así mismo, minimiza la exposición del personal de respuesta y las comunidades locales al hidrocarburo en el contexto más amplio. Los VOC presentes en el hidrocarburo dispersado se disolverán en el mar en vez de evaporarse en el aire.
- El uso de SSDI reduce la cantidad de dispersante necesario si se compara con la aplicación en superficie y puede operar día y noche.
- Reduce la cantidad de hidrocarburos que alcanzan la costa, lo que puede reducir la magnitud y la duración de las operaciones de limpieza de la costa.
- Evita la creación de un gran volumen de materiales de desecho a menudo asociado con las operaciones de limpieza del litoral; dichos desechos plantean serios desafíos ambientales durante su manejo, almacenamiento y eliminación.

En resumen, un sistema eficiente de entrega de dispersante bajo la superficie del mar podría potencialmente tratar la vasta mayoría de hidrocarburos que escapan de un solo punto de descarga antes de que llegue a la superficie y forme una mancha flotante ampliamente extendida. Los hidrocarburos dispersados en la profundidad en forma de pequeñas gotas no subirán a la columna superior de agua donde hay generalmente una mayor abundancia de vida marina.

Una vez implementada, la SSDI puede tratar el hidrocarburo liberado desde un punto de la fuente con una tasa de encuentro alta, puede continuar día y noche y generalmente no se limita por el clima. Sin embargo, cuando se aplica SSDI desde un barco en la superficie, el barco puede necesitar detener la aplicación y regresar a puerto si surgen condiciones climáticas extremas como un huracán o un tifón. Los sistemas de SSDI autónomos o controlados a distancia pueden continuar funcionando bajo dichas condiciones.

Riesgos potenciales del uso de dispersantes bajo la superficie del mar

Cualquier uso con éxito de dispersantes (en la superficie o bajo la superficie del mar) implica la transferencia de una mayor cantidad de hidrocarburos a la columna de agua que lo que ocurriría de otra forma. El riesgo potencial del uso de dispersantes es la mayor exposición de los organismos marinos de la columna de agua de las profundidades del mar a las gotas de hidrocarburos dispersados y a los compuestos hidrosolubles liberados de estas gotas de hidrocarburos.

En muchos reventones de hidrocarburo y gas bajo la superficie del mar, una proporción significativa del volumen del hidrocarburo liberado puede ya haber sido producido en la forma de una columna de gotas muy pequeñas de hidrocarburo en el agua por la turbulencia creada por el flujo de alta velocidad del hidrocarburo y el gas en el agua. Agregar dispersantes al hidrocarburo liberado incrementará la proporción del hidrocarburo dispersado en forma de gotas muy pequeñas de hidrocarburo, pero a partir de un valor ya alto, no de cero.

Las percepciones de la comunidad del daño respecto del uso de SSDI tiene el potencial de impactar la confianza en el mercado de las pesquerías.

Un proceso para evaluar el uso de dispersantes se analiza a mayor detalle en el contexto del análisis de beneficio ambiental neto (ABAN) en las páginas 29 a 34.

Capacidades y límites

Las capacidades y los límites del uso de dispersantes en hidrocarburos flotantes se describen en la Guía de buenas prácticas para la aplicación de dispersantes en superficie de IPIECA-IOGP (IPIECA-IOGP, 2015)

Capacidades del uso de dispersantes bajo la superficie del mar

Los métodos de respuesta bajo la superficie del mar tienen la capacidad potencial, una vez implementados, de tratar con todo el hidrocarburo liberado desde el punto de la fuente. Esto contrasta con una respuesta a hidrocarburos flotantes, donde la zona amplia de hidrocarburos fragmentados y dispersos en la superficie del mar es a menudo un factor limitante. La tasa a la cual cualquier método de respuesta puede entrar en contacto con el hidrocarburo es comúnmente llamada la tasa de encuentro. La tasa de encuentro de los métodos de respuesta en superficie, particularmente de aquellos implicados en la contención del hidrocarburo, puede ser baja. Sin embargo, la tasa de encuentro de todos los métodos de respuesta bajo la superficie del mar es potencialmente muy alta; todo el hidrocarburo liberado se puede “encontrar” en una zona muy pequeña, aunque esta área limitada puede encontrarse a cierta distancia debajo de la superficie del mar.

La capacidad potencial del uso de dispersantes bajo la superficie del mar debe, por lo tanto, compararse inicialmente con la de otros métodos de respuesta a nivel submarino como el sellado y la contención y la recuperación bajo la superficie del mar. Un factor limitante común a todos estos métodos es la velocidad con la cual el equipo y el personal necesarios se pueden implementar en el sitio de la descarga de hidrocarburos y la capacidad de realizar la respuesta en la profundidad del agua a la cual ocurre la descarga.

La logística involucrada para transportar equipo voluminoso y pesado asociado con el sellado y la contención bajo la superficie del mar (un dispositivo de sello puede pesar 300 toneladas) desde donde se almacena hasta el lugar donde se requiere puede ser formidable.

Tabla 5 Comparación de las características y límites del sellado, la contención y la inyección de dispersante bajo la superficie del mar

Factor	Sellado bajo la superficie del mar	Contención bajo la superficie del mar	Inyección de dispersante bajo la superficie del mar
Tasa a la cual se puede encontrar el hidrocarburo derramado	Muy alta		
Tasa de tratamiento de hidrocarburos	Evita el flujo del fluido del pozo	Captura fluido del pozo	Muy alta
Factores de la implementación	Puede ser necesaria la eliminación inicial de desechos	Es aplicable en situaciones poco frecuentes donde el sellado no es suficiente o no es posible	Es aplicable donde los sistemas de sellado y contención se están implementando
Límites	Los sistemas actuales generalmente se limitan a una profundidad máxima del agua de 3000 m y a una presión de 15.000 psi.	Los sistemas actuales generalmente se limitan a una profundidad máxima del agua de 3000 m	Los sistemas actuales generalmente se limitan a una profundidad máxima del agua de 3000 m

Límites a la aplicación de dispersantes bajo la superficie del mar

Las condiciones predominantes del mar y las propiedades del hidrocarburo, especialmente la viscosidad del hidrocarburo, y la forma en que esta viscosidad aumenta a medida que el hidrocarburo derramado se “meteoriza”, determinan la eficacia del uso de dispersantes en hidrocarburos flotantes.

El uso de dispersante bajo la superficie del mar no se verá afectado por la energía de mezclado predominante proporcionada por el oleaje en la superficie del mar o por el cambio en las propiedades del hidrocarburo a medida que “envejece”.

En un reventón bajo la superficie del mar, hay un “suministro” continuo de crudo y gas del depósito. El dispersante se agregaría al hidrocarburo a medida que fluye en el agua. Aunque las propiedades del hidrocarburo cambiarán rápidamente debido a la disolución en el agua de una parte de los compuestos hidrosolubles del hidrocarburo y de la caída brusca de la temperatura a medida que el hidrocarburo ingresa al mar, es menos probable que esto reduzca la eficacia del dispersante en el caso de la mayoría de los hidrocarburos crudos. El crudo que se libera de un pozo bajo la superficie será con frecuencia a alta temperatura, aunque se enfriará rápidamente al entrar en contacto con el agua fría en descargas profundas. Si el crudo tiene un punto de escurrimiento muy alto debido a un alto contenido de cera, es posible que se solidifique al entrar en contacto con el agua y adquirir la forma de una columna de gotas de cera solidificada.

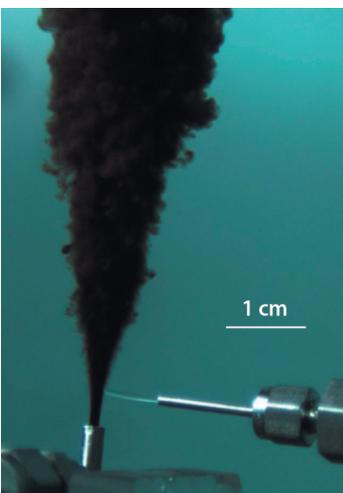
Un límite potencial al uso de dispersantes bajo la superficie del mar podría ser la eficacia de su aplicación en el lugar de la descarga. Los dispersantes se deben agregar al hidrocarburo a medida que el hidrocarburo y el gas entran al agua. Los estudios (Brandvik *et al.*, 2014a y 2013 y Johansen *et al.*, 2013) han mostrado que el tiempo disponible para que los surfactantes presentes en el dispersante influyan la formación de gotas después de que el hidrocarburo se ha liberado es muy limitado:

- Si se inyecta dispersante en el hidrocarburo y el gas antes de la descarga, por ejemplo, si se inyecta dispersante en un conducto ascendente roto, este se debe inyectar a no menos de seis diámetros de la descarga antes de la descarga.
- Si se agrega el dispersante en el flujo de salida turbulento de una descarga de hidrocarburos y gas, el dispersante se debe agregar solo ligeramente encima de la descarga de hidrocarburos y gas a un máximo de 10 diámetros de la descarga.

Los sistemas SSDI se han desarrollado considerando los requisitos anteriores para permitir operaciones eficaces. La inyección de dispersantes en el hidrocarburo antes de la salida del punto de la descarga puede ser mejor que rociar el chorro de hidrocarburo liberado cerca del punto de la descarga. El punto de inyección debe estar dentro del chorro energético antes de que empiece a romperse en gotas individuales. La distancia fuera del punto de descarga donde esto ocurre depende de las condiciones de la descarga.

Si no es posible inyectar el dispersante en el flujo de hidrocarburos y gas antes de la descarga, la siguiente mejor opción es llegar lo más cerca posible del punto de la descarga. Los dispersantes han demostrado ser eficaces bajo condiciones de prueba siempre y cuando sean inyectados en el chorro sólido energético del hidrocarburo antes de que se rompa en gotas. Un requisito fundamental para la inyección fuera del punto de la descarga será asegurarse de que el dispersante se distribuya alrededor del chorro y no en un solo lado. La forma más eficaz de hacer esto puede ser usar anillos de inyección.

Abajo: fotografía de un tanque de prueba que muestra la inyección de dispersante en una descarga; el dispersante es visible como una línea blanca absorbida por la columna de hidrocarburo ascendente.



SINTEF

Toxicidad y capacidad de biodegradación de los hidrocarburos

Compuestos químicos presentes en los hidrocarburos crudos

Los hidrocarburos crudos se componen de una gran cantidad de compuestos químicos individuales. Casi todos estos son hidrocarburos, compuestos únicamente de hidrógeno y carbono. Los hidrocarburos se pueden clasificar por el peso molecular o por la longitud de la cadena de carbono; la mayoría de los hidrocarburos en el petróleo crudo contienen de 5 a 35 átomos de carbono. También se puede clasificar a los hidrocarburos de acuerdo con el tipo químico; alcanos (parafinas), cicloalcanos (naftenos) y compuestos aromáticos (que contienen uno o más anillos de benceno). Las proporciones relativas de estos compuestos químicos difieren de un crudo a otro y son responsables de la gama de propiedades físicas que muestran los crudos. La mayoría de los hidrocarburos presentes en la mayoría de los petróleos crudos son alcanos y cicloalcanos y pueden variar de líquidos volátiles a líquidos no volátiles o sólidos (ceras) dependiendo de su tamaño (cantidad de átomos de carbono) y la temperatura predominante.

Compuestos químicos potencialmente tóxicos de los hidrocarburos

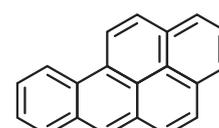
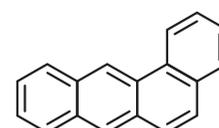
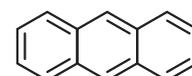
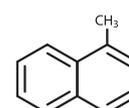
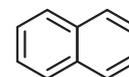
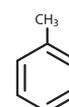
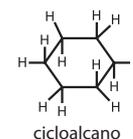
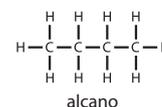
La mayoría de los alcanos y cicloalcanos tienen un potencial limitado de causar efectos tóxicos en los organismos marinos debido a su baja solubilidad en el agua. Los hidrocarburos aromáticos son parcialmente hidrosolubles y generalmente se consideran el componente con mayor potencial de toxicidad de los crudos y los combustibles respecto de los organismos acuáticos (Anderson et al., 1974; Di Toro et al., 2007).

Recuadro 1 Compuestos químicos aromáticos en hidrocarburos

- **Compuestos aromáticos de un anillo:** estos son el benceno, el tolueno, el etilbenceno y los xilenos, a menudo llamados compuestos BTEX. Los hidrocarburos crudos contienen desde alrededor un 0,5% hasta un 5% de BTEX. La gasolina puede contener hasta un 40% de BTEX. Los compuestos BTEX son relativamente hidrosolubles, aunque también comprenden la mayoría de los VOC y, de alcanzar la superficie, se evaporarán rápidamente en el aire a partir del hidrocarburo flotante.
- **Compuestos aromáticos de dos anillos:** son el naftaleno y los derivados del alquil sustituido. Los diferentes hidrocarburos crudos contienen desde un 0% hasta un 0,4% de naftaleno y desde un 0% hasta un 1% o más de naftalenos sustituidos. Estos compuestos son menos hidrosolubles que los BTEX y de volatilidad moderada.
- **Hidrocarburos aromáticos policíclicos de 3, 4 y 5 anillos (HAP):** los hidrocarburos crudos contienen desde 0 ppm hasta varios cientos de ppm de compuestos aromáticos de tres anillos, pero mucho menos, generalmente de 1 a 10 ppm de compuestos individuales de 4 y 5 anillos. Estos compuestos PAH no son volátiles, y los compuestos de 3 y 4 anillos son ligeramente hidrosolubles.

Prueba de toxicidad de los dispersantes y de los hidrocarburos dispersados

La prueba de toxicidad de los dispersantes y de las mezclas de dispersante/hidrocarburo (para producir hidrocarburos dispersados) se realiza para diferentes fines y utilizando una variedad de métodos de prueba de toxicidad. La intención de la prueba de toxicidad de dispersantes fue asegurar que no se repita el uso de detergentes industriales tóxicos, como aquellos usados en grandes cantidades en el derrame del *Torrey Canyon* en el Reino Unido en 1967 (Smith, 1968). Actualmente, para ser aprobados, la mayoría de los países exigen que los dispersantes demuestren una toxicidad menor que el nivel considerado aceptable.



Arriba: ejemplos de compuestos aromáticos

Una prueba de toxicidad CL₅₀ (concentración letal del 50% de la población de prueba) de 96 horas o 48 horas con una variedad de especies de prueba se utilizó para determinar la toxicidad de los dispersantes. El propósito de la prueba de toxicidad CL₅₀ de 48 o 96 horas es determinar la concentración de dispersantes en el agua que mate a la mitad de las criaturas expuestas durante ese tiempo especificado. Por lo tanto, se puede utilizar la prueba para clasificar la toxicidad comparativa de diferentes dispersantes. El régimen de exposición (la concentración de dispersante en el agua y la duración de la exposición) en una prueba CL₅₀ no simula la exposición al dispersante que un organismo marino podría experimentar si el dispersante es usado en hidrocarburos derramados en el mar.

En los EE. UU., las pruebas de toxicidad requeridas por la Agencia de Protección al Ambiente de los EE. UU. (EPA) para los dispersantes a ser incluidos en el PNC (Plan Nacional de Contingencias para contaminación con hidrocarburos y sustancias nocivas) el programa del producto incluye pruebas con dos especies estándar de la EPA: el pez continental pejerrey (*Menidia beryllina*) y el camarón místico (*Americamysis bahia*). El régimen de exposición del procedimiento de la prueba de toxicidad CL₅₀ no simula el uso de dispersante en hidrocarburos derramados en el mar porque las concentraciones usadas en la prueba son mucho mayores y la duración de la exposición es mucho mayor que lo que ocurriría en el mar. Sin embargo, la prueba de toxicidad CL₅₀ proporciona una forma de evaluar la magnitud relativa de los efectos tóxicos que se podrían ser causados por los dispersantes o el hidrocarburo dispersado bajo las condiciones de exposición de la prueba.

Al momento del incidente del Macondo, se probó la toxicidad de ocho dispersantes en el programa del producto NCP (Hammer *et al.*, 2010).

Los niveles medidos de toxicidad en las pruebas CL₅₀ fueron clasificados en una escala de cinco niveles desde "muy altamente tóxico" hasta "prácticamente no tóxico" de la forma usada por la EPA en los EE. UU. para interpretar los resultados de las pruebas CL₅₀ (EPA, EE. UU., 2012). Esta escala de clasificación de la toxicidad también se utiliza a nivel internacional (GESAMP, 2014).

Tabla 6 Resultados de prueba de la EPA de EE. UU. de ocho dispersantes en el programa de NCP

Categorías de ecotoxicidad de la EPA (ppm = partes por millón)	Camarón místico CL ₅₀ 48 horas	Pez pejerrey CL ₅₀ 96 horas
Muy altamente tóxico: <0,1 ppm		
Altamente tóxico: 0,1-1 ppm		
Moderadamente tóxico: >1-10 ppm		Dispersit SPC 1000
Ligeramente tóxico: >10-100 ppm	Dispersit SPC 1000 Nokomis 3-AA COREXIT® 9500A Nokomis 3-F4 ZI-400	Nokomis 3-F4 Nokomis 3-AA ZI-400 Saf-Ron Gold Sea Brat #4
Prácticamente no tóxico: >100 ppm	Saf-Ron Gold JD-2000	COREXIT® 9500A JD-2000

US EPA, 2012

La mayoría del dispersante utilizado en el incidente del Macondo fue COREXIT® 9500A, y fue clasificado como “ligeramente tóxico” para el camarón místico y “prácticamente no tóxico” para el pejerrey en las pruebas de toxicidad CL₅₀.

La misma metodología de la prueba de toxicidad usada para el listado en el programa De producto NCP fue usada por la EPA (EPA, EE. UU., 2010) para determinar la magnitud relativa de los efectos tóxicos que podrían ser causados por:

- El petróleo crudo dulce Louisiana (LSC) dispersado mecánicamente;
- El dispersante usado durante las operaciones de respuesta al impacto del Macondo: COREXIT® EC9500A; y
- El crudo LSC dispersado usando una mezcla de 1:10 de COREXIT® EC9500A y LSC.

Los resultados resumidos en la tabla 7 muestran que el dispersante solo tiene menos efectos tóxicos que el hidrocarburo crudo solo. El dispersante solo se considera “prácticamente no tóxico” para las especies de peces y únicamente “ligeramente tóxico” para el camarón, mientras que el hidrocarburo crudo dispersado mecánicamente se califica como “moderadamente tóxico” para ambos. El hidrocarburo crudo dispersado con el dispersante tiene la misma calificación que el hidrocarburo crudo dispersado mecánicamente de “moderadamente tóxico” para ambas especies. En este caso, los efectos tóxicos medidos son causados por el hidrocarburo, no el dispersante. Consecuentemente, no es adecuado evaluar la toxicidad del dispersante al realizar pruebas de toxicidad en el hidrocarburo dispersado.

Tabla 7 Resumen de los resultados de la prueba de toxicidad acuática CL₅₀ de la EPA de EE. UU. Para el hidrocarburo dispersado, dispersante y el hidrocarburo dispersado de la respuesta al impacto del Macondo

Categorías de ecotoxicidad de la EPA (ppm = partes por millón)	Petróleo crudo dulce Louisiana (LSC)		Dispersante (COREXIT® EC9500A)		Hidrocarburo dispersado (LSC + COREXIT® EC9500A)	
	Camarón místico	Pez pejerrey	Camarón místico	Pez pejerrey	Camarón místico	Pez pejerrey
Muy altamente tóxico: <0,1 ppm						
Altamente tóxico: 0,1-1 ppm						
Moderadamente tóxico: >1-10 ppm	2,7 ppm	3,5 ppm			5,4 ppm	7,6 ppm
Ligeramente tóxico: >10-100 ppm			42 ppm			
Prácticamente no tóxico: >100 ppm				130 ppm		

US EPA, 2010

La prueba de toxicidad CL₅₀ utilizó una mezcla de dispersante e hidrocarburo al 10:1. Esto representa más dispersante que el que se utilizaría en una aplicación bajo la superficie del mar, donde la relación es de 1:100 o de 1:50 generalmente.

En el uso real de dispersantes, ya sea en hidrocarburos flotantes o mediante inyección bajo la superficie del mar, la duración de la exposición a los organismos marinos al hidrocarburo dispersado y la concentración del hidrocarburo dispersado estarán en función de una variedad de factores, incluidas las condiciones medioambientales y las circunstancias del derrame de hidrocarburos.

Exposición a hidrocarburos, hidrocarburos dispersados y compuestos hidrosolubles de los hidrocarburos

Una de las bases fundamentales de la toxicología es que la magnitud del efecto en un organismo causado por un compuesto químico depende de la exposición del organismo al compuesto químico. La exposición está en función de la vía de exposición, la concentración del producto químico al cual el organismo está expuesto y la duración de la exposición.

Una vez ocurrido un derrame de hidrocarburos bajo la superficie del mar, algunos organismos marinos serán expuestos a elevadas concentraciones de pequeñas gotas del hidrocarburo dispersado y a los compuestos hidrosolubles de los hidrocarburos en la parte superior de la columna de agua. En un reventón a alta presión de hidrocarburos y gas bajo la superficie del mar, es probable que todo el hidrocarburo sea liberado en la forma de gotas de hidrocarburo. Una proporción importante del hidrocarburo liberado puede convertirse en pequeñas gotas de hidrocarburo por efecto de la turbulencia producida por la descarga de hidrocarburos y gas. En estas circunstancias, muchos de los compuestos aromáticos de menor peso molecular (los BTEX y los PAH de 2 y 3 anillos) se transferirán rápidamente desde el hidrocarburo al agua donde estarán sujetos a la rápida dilución y biodegradación.

Estos compuestos tienen el potencial de dañar los organismos marinos que se encuentran en las cercanías del reventón bajo la superficie del mar y que quedan expuestos a estos compuestos disueltos, así como a las concentraciones de hidrocarburos dispersados en el agua. Las gotas más grandes de hidrocarburo, las burbujas de gas y los compuestos hidrosolubles de los hidrocarburos se elevarán rápidamente a través de la columna de agua, creando un riesgo potencial a los organismos pelágicos (en la columna de agua), más que a los bentónicos (los que viven ya sea en el fondo o sobre el fondo del lecho marino) o a los organismos demersales que viven cerca del lecho marino.

Las concentraciones de gotas de hidrocarburos y compuestos hidrosolubles de los hidrocarburos disminuyen rápidamente a medida que la columna flotante incorpora agua y se diluye al ascender a través de la columna de agua. Sin embargo, mientras continúe el reventón, habrá una concentración relativamente alta de gotas de hidrocarburos y compuestos hidrosolubles de los hidrocarburos en las proximidades de la descarga.

Efectos del uso de dispersantes bajo la superficie del mar

Si el uso de dispersantes bajo la superficie del mar es eficaz, las gotas de hidrocarburo que entran al agua como columna serán de menor tamaño. Esto mejorará la tasa de transferencia de los compuestos hidrosolubles del hidrocarburo hacia el agua debido a que la superficie de aceite/agua se incrementa con las gotas más pequeñas de hidrocarburo. Esto provocará mayores concentraciones de hidrocarburos dispersados (gotas muy pequeñas de hidrocarburo) y compuestos hidrosolubles en el agua en muy cerca de la descarga. Aunque la SSDI incrementa estas concentraciones, es posible que ya sean lo suficientemente altas cerca de la fuente sin el uso de dispersante. Por lo tanto, el potencial de efectos tóxicos sobre los organismos marinos presentes en la cercanía de la descarga de hidrocarburos y gas bajo la superficie del mar se incrementa por el uso de dispersante, pero partiendo de una condición comparativa ya alta. Los hidrocarburos que son dispersados por SSDI generalmente serán flotantes neutrales y crearán columnas bajo la superficie de hidrocarburos dispersados a bajas concentraciones. Estas columnas estarán a la deriva, se diluirán y biodegradarán.

Exposición de los organismos marinos por ingestión de las gotas de hidrocarburo dispersado

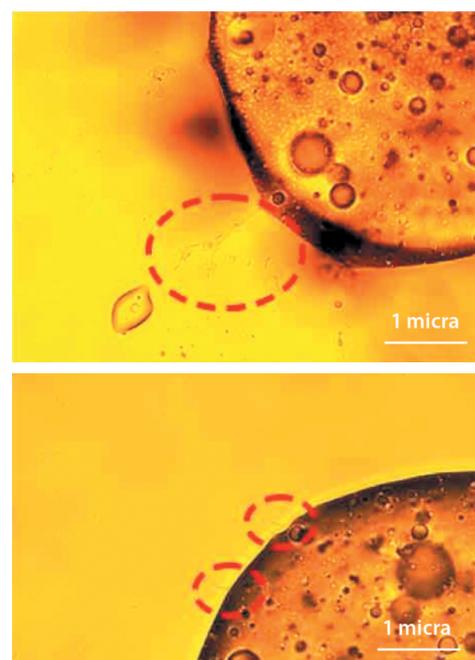
La ingestión de alimentos ofrece a los organismos marinos la vía potencial de exposición a PAH de mayor peso molecular. Los organismos que se alimentan por filtración que consumen plancton pueden ingerir gotas de hidrocarburo dispersado de manera natural, o química, cuando estas gotas son de un tamaño similar al tamaño de algunas formas de plancton. Los organismos relativamente sencillos, como lo bivalvos, no pueden procesar bioquímicamente los PAH de alto peso molecular presentes en los hidrocarburos, y estos PAH se pueden acumular ("bioacumular") en algunos órganos (Neff y Burns, 1996). Los predadores que consumen bivalvos contaminados con hidrocarburos pueden, por lo tanto, exponerse a altas concentraciones de los HAP de alto peso molecular mediante esta vía de ingestión. Los organismos que poseen hígado, como los peces, pueden metabolizar rápidamente los PAH, aunque algunos de estos metabolitos pueden ser peligrosos. Sin embargo, no es probable que los bivalvos sean expuestos a hidrocarburos dispersados bajo la superficie del mar ya que estos son organismos bentónicos y, por lo tanto, es más probable que se expongan a manchas en la superficie dispersadas de manera natural en aguas someras. El plancton y los copépodos pueden encontrarse en la parte media o más profunda de la columna de agua y son, por lo tanto, más susceptibles a la exposición. La baja concentración de hidrocarburos dispersados, junto con la abundancia y la rápida recuperación de sus poblaciones, es posible que limite los impactos en estos organismos.

Biodegradación de los hidrocarburos

Las gotas de hidrocarburos en la columna de agua son colonizadas rápidamente por microorganismos degradadores del petróleo de ocurrencia natural en los medios ambientes oceánicos (King *et al.*, 2014). Todos los océanos del mundo tienen infiltraciones de hidrocarburos de manera natural (Kvenvolden, 2003) y se encuentran microorganismos degradadores de hidrocarburos en todos los medios ambientes marinos, incluso en medios ambientes fríos u oscuros, habiendo evolucionado para degradar petróleo de estas infiltraciones. La mayoría de los componentes químicos de los hidrocarburos crudos presentes en estas gotas tienen únicamente una hidrosolubilidad limitada y los microorganismos deben habitar la interfaz entre el aceite y el agua para biodegradar el hidrocarburo. El hidrocarburo dispersado en la forma de pequeñas gotas tiene un área de interfaz aceite/agua mucho mayor que una mancha de hidrocarburos flotando en la superficie del mar. Este incremento en el área interfacial da como resultado una mayor adhesión microbiana y una biodegradación más rápida. Una comunidad de microorganismos (bacterias y hongos) consume y degrada el hidrocarburo a medida que crece y se reproduce y, a continuación, protozoarios y nemátodos mayores consumen las bacterias. Por lo tanto, el hidrocarburo es asimilado en el medio ambiente (Academia Americana de Microbiología, 2011) y dejan de plantear un riesgo. Los hidrocarburos dispersados también se diluyen rápidamente. Para el momento en que una gota individual es colonizada totalmente por microorganismos y la biodegradación se vuelve significativa, las concentraciones de hidrocarburos dispersados en el agua es probable que sean muy bajas. A estas bajas concentraciones, la mayoría de los medios ambientes marinos tienen suficiente oxígeno, fósforo, nitrógeno y otros nutrientes que permiten la biodegradación aeróbica adecuada para proceder.

La Figura 5 muestra una fotomicrografía de una gota de hidrocarburo con bacterias marinas degradadoras de hidrocarburos unidas. Se puede ver que los microorganismos (es decir, de unas cuantas micras de longitud) que degradan el hidrocarburo pueden ser mucho menores que las mismas gotas de hidrocarburos (es decir, algunas decenas de micras de diámetro).

Figura 5 Los microorganismos biodegradadores empiezan a "comer" la gota de hidrocarburo dispersado



Hazen *et al.*, 2010

La biodegradación procede principalmente por la oxidación bioquímica (Atlas y Bartha, 1992; Atlas y Cerniglia, 1995; Prince, 1997; Prince *et al.*, 2013). Los diferentes compuestos químicos presentes en los hidrocarburos crudos se degradan a diferentes tasas y a diferentes grados (Singer y Finnerty, 1984; Lindstrom y Braddock, 2002; Campo *et al.*, 2013). Los alcanos de cadena lineal serán los más rápidamente biodegradados, seguidos por los compuestos aromáticos de anillo simple y después por los alcanos de cadena ramificada y los cicloalcanos. Muchos hidrocarburos de ramificación compleja, cíclicos y aromáticos, los cuales de otra forma no serían biodegradados naturalmente, pueden ser oxidados a través del metabolismo conjunto de una mezcla de hidrocarburos debido a la abundancia de otros sustratos que se pueden metabolizar fácilmente dentro del hidrocarburo (Heitkamp y Cerniglia, 1987).

El destino final de la mayoría del hidrocarburo biodegradado es convertirse finalmente en dióxido de carbono y agua (MacNaughton *et al.*, 2003). Algunos compuestos de los hidrocarburos muy pesados, como el asfalto o el bitumen, son más lentos para biodegradarse. Estos son biológicamente inertes y son no tóxicos o prácticamente no tóxicos.

La concentración del hidrocarburo dispersado en el agua disminuirá progresivamente a niveles indetectables a medida que las gotas de hidrocarburo se diluyan adicionalmente en la columna de agua. Los surfactantes y solvente en los dispersantes son biodegradables y el dispersante por lo tanto, también será biodegradado, generalmente más rápido que el hidrocarburo. Los compuestos del hidrocarburo que no se pueden degradar rápidamente, estarán presentes inicialmente a muy bajas concentraciones de unas pocas ppb (partes por cada mil millones) en el agua como remanentes de las gotas de hidrocarburos dispersadas biodegradadas. Este residuo de hidrocarburo finalmente se depositará a estas bajas concentraciones sobre una amplia área del lecho marino.

Para resumir, la dispersión de hidrocarburo al agregar dispersantes permite una mejora significativa del proceso de biodegradación natural. El hidrocarburo que se dispersa de manera eficaz perdurará en el medio ambiente durante días o semanas, mientras que el hidrocarburo flotante no dispersado que envejece, se emulsiona y, en última instancia, encalla en las costas podría persistir en el medio ambiente durante varios años.

Análisis de beneficio ambiental neto

El Análisis de Beneficio Ambiental Neto (ABAN) es un proceso utilizado por la comunidad de respuesta para tomar las mejores decisiones para minimizar el impacto de los derrames de hidrocarburos en las personas y el medio ambiente: ver la Guía de buenas prácticas acerca de Análisis de Beneficio Ambiental Neto (ABAN) de IPIECA-IOGP (IPIECA-IOGP, 2015b).

El ABAN funciona a diferentes etapas de un derrame:

- El ABAN es una parte integral del proceso de planificación para contingencias, y se utiliza para asegurarse de que la estrategia de respuesta para los escenarios de planificación esté bien informada.
- Durante una respuesta, se utiliza el proceso del ABAN para asegurarse de que las condiciones cambiantes se comprendan adecuadamente y se evalúen de forma que la estrategia de respuesta se pueda adaptar y ajustar según sea necesario.
- También se puede utilizar el proceso del ABAN para asegurarse de que se definan y se logren los criterios de evaluación final a largo plazo de la respuesta.

El ABAN involucra la consideración y el juicio para comparar los posibles resultados de utilizar diferentes métodos de respuesta y recomendaciones a derrames de hidrocarburos en cuanto a las tácticas preferidas, basado en las consideraciones del personal de respuesta experimentado y las consultas con los grupos de interés. El Análisis de Beneficio Ambiental Neto (ABAN) generalmente involucra los siguientes pasos para los escenarios identificados y se debe realizar antes de un derrame de hidrocarburos como parte integral de la planificación para contingencias ante derrames de hidrocarburos.

Tabla 8 Los pasos típicos del proceso del Análisis de Beneficio Ambiental Neto (ABAN) en el proceso de planificación para contingencias ante derrames de hidrocarburos

Paso del ABAN	Descripción
Evaluar los datos	La primera etapa consiste en considerar dónde se encuentra el derrame del hidrocarburo y a dónde se trasladará a la deriva bajo la influencia de las corrientes y el viento: como elementos de apoyo para este paso, existen varios modelos de trayectorias de derrames de hidrocarburos. También es útil saber cómo se “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. Se incluyen aquí los métodos de respuesta, los aspectos prácticos de su utilización y la cantidad de hidrocarburo se puede 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 ayudar a evaluar cuáles métodos de respuesta ante derrames de hidrocarburos tienen probabilidades de ser eficaces. Las consideraciones operativas pragmáticas deben formar una parte muy importante del proceso del Análisis de Beneficio Ambiental Neto (ABAN) aplicado a todas las opciones de respuesta viables.
Sopesar ventajas y desventajas	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 finaliza con la adopción del método o los métodos de respuesta dentro de los planes de contingencia para derrames de hidrocarburos que minimicen los posibles impactos de posibles derrames en el medio ambiente y promuevan la recuperación y la restauración más rápidas de la zona afectada.



Paso 1: Evaluar los datos

Un aspecto importante de la planificación para contingencias ante derrames de hidrocarburos es usar escenarios de descargas de hidrocarburos realistas (ver la Guía de buenas prácticas acerca de la planificación para contingencias de IPIECA-IOGP, IPIECA-IOGO, 2015c). Se deben desarrollar varios escenarios de descargas de hidrocarburos bajo la superficie del mar, hasta incluir un caso creíble de descarga. Se deben tomar en cuenta las condiciones predominantes predecidas.

Se debe realizar el modelado para ayudar a predecir el comportamiento del hidrocarburo liberado. Hay disponibles varios modelos de computadora para modelar los reventones de hidrocarburos y gas bajo la superficie del mar. Un modelo debe tomar en cuenta los factores pertinentes como las características del pozo y las características meteorológicas y oceánicas, incluidas las corrientes, las temperaturas, etc. a lo largo de las profundidades relevantes.

Se encuentra en marcha el trabajo para desarrollar modelos que puedan predecir con exactitud las distribuciones de los tamaños de las gotas de hidrocarburos producidas bajo una amplia gama de condiciones de descargas.

Paso 2: Predecir los resultados

La combinación de los mapas de sensibilidad (IPIECA/IMO/IOGP, 2012) con el modelado puede indicar cuáles recursos ecológicos y socioeconómicos (costa afuera, cerca de la costa y en las costas) se encuentran en riesgo potencial frente a los hidrocarburos de no emprenderse ninguna medida. Las formas en que el hidrocarburo puede impactar los diversos recursos ecológicos y socioeconómicos, y los factores que pueden influir en estos impactos, se describen en la Guía de buenas prácticas de IPIECA-IOGP sobre la ecología marina (IPIECA-IOGP, 2015a) y las costas (IPIECA-IOGP, 2016).

Viabilidad del uso de un método de respuesta

Se debe analizar la posible eficacia y viabilidad de realizar los diferentes métodos de respuesta bajo el rango de las posibles condiciones predominantes. Se incluyen aquí los métodos de respuesta, los aspectos prácticos de su utilización y la cantidad de hidrocarburo que se puede recuperar o tratar durante el tiempo que están disponibles para su utilización. Las consideraciones operativas pragmáticas deben formar una parte muy importante del proceso del Análisis de Beneficio Ambiental Neto (ABAN) aplicado a todas las opciones de respuesta viables.

Al momento de considerar una respuesta a una descarga de hidrocarburos bajo el nivel del mar, se debe decidir si la respuesta se debe conducir bajo el nivel del mar (con sellado a nivel submarino) o esperar hasta que el hidrocarburo liberado haya ascendido a la superficie del mar donde la respuesta podría ser contención y recuperación en el mar, quema controlada in situ o uso de dispersantes en superficie. Las características particulares del escenario de la descarga de hidrocarburos bajo la superficie del mar y del comportamiento del hidrocarburo y el gas liberados servirán para informar esta decisión.

- En un reventón de hidrocarburo y gas bajo la superficie del mar, donde el gas se disuelve en el agua y no alcanza la superficie del mar, el uso de embarcaciones de superficie para implementar los dispositivos de sello, los sistemas de contención y recuperación y el equipo para inyección de dispersantes bajo la superficie del mar puede ser una respuesta viable.
- Sin embargo, en un reventón de hidrocarburo y gas bajo la superficie del mar (con flujos de hidrocarburo y presiones similares) en aguas someras, donde el gas no se disolverá totalmente en el agua y alcanzará la superficie del mar, se debe considerar un sistema de equipo posicionado bajo el nivel del mar, implementado a una distancia horizontal de hasta 500 m desde el pozo ya que el riesgo de incendio y explosión posiblemente imposibiliten el uso de embarcaciones en superficie por encima del sitio del pozo.

El tiempo empleado para implementar cualquier equipo de respuesta también puede ser un factor clave al evaluar la viabilidad de realizar la respuesta. Cualquier respuesta a un derrame de hidrocarburos es a menudo una carrera contra el tiempo. Una vez que ha ocurrido una descarga de hidrocarburos bajo la superficie del mar, los riesgos potenciales serán determinados por la proximidad de los recursos que podrían ser dañados y por las condiciones predominantes, como la dirección y la velocidad del viento.

La contención y recuperación en el mar es generalmente el primer método de respuesta a derrame de hidrocarburos que se considera utilizar. Este continuará siendo la causa en el futuro debido a que la vasta mayoría de los derrames de hidrocarburos son pequeños y se ubican cerca de reservas de equipos. A medida que los derrames aumentan de tamaño y se ubican más lejos de los equipos, la contención y la recuperación se vuelve menos eficiente debido a la amplia área del hidrocarburo, menores tasas de encuentro del hidrocarburo y a los problemas logísticos que plantea el transporte del producto recuperado hacia la orilla para procesamiento o eliminación. Este es el motivo de que es necesario que los dispersantes sean aplicados rápidamente por aire o aplicados bajo la superficie del mar. Los dispersantes pueden tratar derrames de hidrocarburos en sitios remotos rápidamente debido a que se pueden implementar por medio de aeronaves de desplazamiento rápido. La implementación de aeronaves significa que los dispersantes pueden tratar amplias áreas mucho más rápidamente que en una respuesta basada en embarcaciones. Los dispersantes bajo la superficie del mar tratan los hidrocarburos en un lugar conocido de manera más eficiente.

Paso 3: Sopesar ventajas y desventajas

La decisión entre usar o no dispersantes no es una decisión entre blanco y negro, a pesar de ser generalmente malinterpretada como un debate de "aves contra peces". Las manchas de hidrocarburos sin tratar que se desplazan a lo largo de la superficie del agua pueden impactar huevos y larvas de peces en la mancha o inmediatamente debajo de esta. Además, los hidrocarburos cerca de la costa y encallados pueden impactar las etapas juveniles de la vida de muchos peces. Si no se dispersan los hidrocarburos, las manchas pueden ir a la deriva y encallar en las costas para impactar pesquerías, posiblemente más que si se dispersa el hidrocarburo si el derrame ocurre durante los períodos críticos de desove o si el hidrocarburo se desplaza al hábitat cerca de la costa crítica para los peces juveniles. Como el daño potencial a los bancos de peces por los hidrocarburos dispersados es bajo, puede haber fuertes argumentos de ABAN de que el uso de dispersantes puede proteger las pesquerías.

Las ventajas y desventajas de los posibles beneficios y riesgos del uso de dispersantes bajo la superficie del mar en un reventón bajo la superficie del mar son similares, aunque no idénticas, a las del uso de dispersantes en hidrocarburos derramados flotantes debido a que las circunstancias son diferentes. Los posibles riesgos a los organismos marinos que plantean los hidrocarburos dispersados son diferentes en términos de escala, lugar y posibles consecuencias.

El riesgo de los efectos tóxicos en los organismos marinos se relaciona con su exposición a los hidrocarburos dispersados y a los componentes parcialmente hidrosolubles liberados del hidrocarburo. La exposición está en función de la concentración y la duración.

Exposición a hidrocarburos dispersados provocada por el uso de dispersantes en hidrocarburos flotantes

Las ondas rompientes que pasan a través de un área localizada de una mancha de hidrocarburos harán que el hidrocarburo se rompa en gotas de hidrocarburo de una gama de tamaños. Las gotas más grandes de hidrocarburo resurgirán rápidamente, pero las gotas más pequeñas de hidrocarburo se dispersarán en la columna de agua. La proporción de hidrocarburo dispersado por dispersión natural es a menudo baja y disminuye a medida que el hidrocarburo se "meteoriza".

El uso de dispersantes aumenta en gran medida la proporción del hidrocarburo que se convierte en pequeñas gotas por la acción del oleaje predominante. Se producen columnas localizadas de gotas de hidrocarburo

dispersado cuando las olas rompientes pasan a través del hidrocarburo flotante tratado con dispersante. La concentración de hidrocarburos (en la forma de gotas) en la parte superior de la columna de agua aumenta rápidamente, pero a continuación disminuye rápidamente a medida que el hidrocarburo se diluye entre el agua circundante. A medida que la mancha de hidrocarburo se desplaza a la deriva bajo la influencia del viento, las olas adicionales rompientes provocarán que se produzcan nubes aisladas de hidrocarburo dispersado en la columna de agua en ubicaciones a alguna distancia de donde las nubes anteriores fueron producidas y posteriormente diluidas. Las concentraciones máximas del hidrocarburo dispersado en el agua son bajas y de corta duración, y ocurren en ubicaciones dispersas durante un periodo debajo del hidrocarburo tratado con dispersante.

Los organismos marinos que viven en la capa superior de la columna de agua (hasta una profundidad máxima de 5 a 10 m) pueden estar brevemente expuestos a concentraciones mayores de pequeñas gotas del hidrocarburo dispersado y a los compuestos hidrosolubles del hidrocarburo en la columna de agua, comparado con la situación si los dispersantes no se usaran. En caso de no utilizarse dispersantes, ocurrirá cierto grado de exposición debido a la dispersión natural; ver la Guía de buenas prácticas DE IPIECA-IOGP acerca de la aplicación de dispersantes en superficie (IPIECA-IOGP, 2015).

Exposición a hidrocarburos dispersados provocada por SSDI en una descarga de hidrocarburos bajo la superficie del mar

La descarga continua de grandes cantidades de hidrocarburos y gas desde un punto de la fuente producirá altas concentraciones de hidrocarburos dispersados y de componentes hidrosolubles del hidrocarburo en el agua cerca de la descarga. La concentración del hidrocarburo dispersado en el agua se diluirá y disminuirá a medida que la columna asciende y se aleja a la deriva. El uso de SSDI provocará un aumento adicional en estas concentraciones ya altas de hidrocarburo dispersado en el agua cercana a la descarga. Estas altas concentraciones de hidrocarburo dispersado en el agua cercana a la fuente se mantendrán mientras continúe la descarga de hidrocarburos y gas (de la manera que se ilustra en la Figura 4 de la página 18).

El régimen de exposición para los organismos marinos expuestos a los hidrocarburos dispersados y a los compuestos hidrosolubles de los hidrocarburos en la columna de agua dependerá de su proximidad a la descarga, la dirección de la deriva de las columnas y la capacidad de los organismos marinos de detectar hidrocarburos y alejarse para evitarlos. Los organismos sésiles en el lecho marino que no pueden alejarse pueden experimentar mayor exposición a los hidrocarburos dispersados que aquellos organismos que pueden nadar y alejarse. Los organismos sésiles cercanos a la descarga pueden estar expuestos a altas concentraciones de hidrocarburos dispersados durante periodos prolongados.

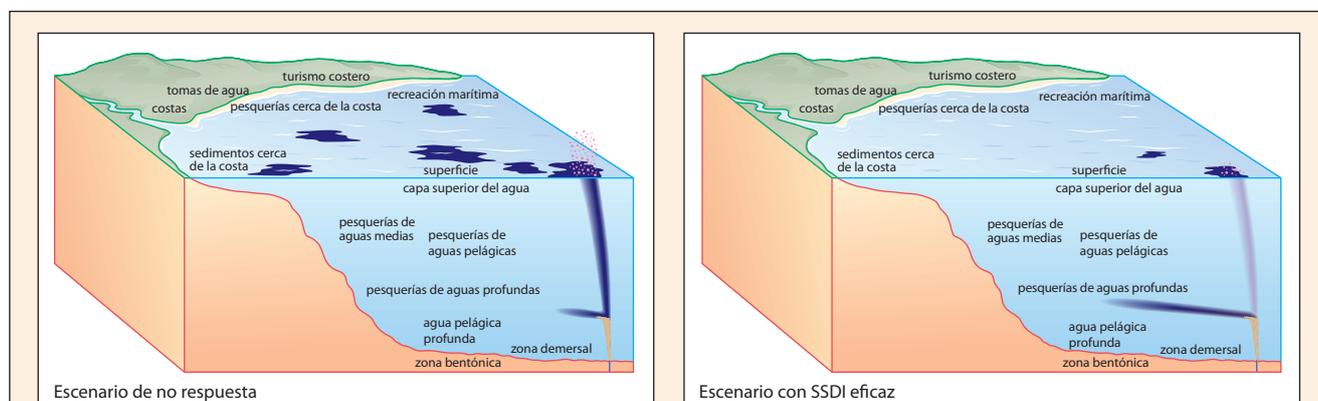
Los efectos reales del régimen de exposición a hidrocarburos dispersados producidos por SSDI dependerán de los organismos marinos presentes en la cercanía de la descarga de hidrocarburos y gas bajo la superficie del mar o cerca de las columnas bajo la superficie del mar de hidrocarburos dispersados que se mueven a la deriva, se diluyen y se biodegradan. En general, la densidad poblacional en aguas profundas es menor que la que existe cerca de la superficie del mar.

El elemento esencial del ABAN al considerar el uso de dispersantes bajo la superficie del mar y al comparar su eficacia probable frente a los otros métodos de respuesta será la necesidad de considerar los posibles resultados de:

- no realizar ninguna respuesta, es decir, no usar dispersantes bajo la superficie del mar ni otro tipo de respuesta, comparado con
- el uso de dispersantes bajo la superficie del mar.

Cualquier consideración de las ventajas y desventajas del uso de dispersantes bajo la superficie del mar debe considerar la cantidad del daño severo y a largo plazo a los hábitats costeros sensibles a los hidrocarburos y potencialmente a los recursos socioeconómicos que es posible evitar por el uso de dispersantes y compararlo con los efectos potenciales localizados en el entorno marino por el uso de dispersantes. El Recuadro 2 en la página 33 ofrece un escenario de ejemplo que ilustra la forma en que el uso de SSDI puede lograr un beneficio neto comparado con la situación de no haber ninguna respuesta.

Recuadro 2 Escenario de ejemplo para ilustrar la forma en que el uso de SSDI puede lograr un beneficio neto comparado con la situación de no haber ninguna respuesta



Este escenario representativo indica la forma en que el uso correcto de SSDI puede reducir las consecuencias generales de una descarga y así lograr un beneficio ambiental neto.

Se debe advertir que este ejemplo es ilustrativo y que en los casos específicos de planificación para contingencias por derrames de hidrocarburos se deben considerar los detalles específicos de una operación, incluidos los recursos medioambientales locales, su valor ecológico, comercial y cultural, así como su estacionalidad.

Compartimiento medioambiental		Población/recursos representativos	Posible consecuencia relativa* sin respuesta	Posible consecuencia relativa con SSDI	
Zona bentónica del lecho marino		Organismos excavadores	Insignificante	Insignificante	
Columna de agua	Zona demersal cerca del lecho marino	Pez plano	Insignificante	Insignificante	
	Zona pelágica de aguas profundas (>400 m)	Pez de cuerpo redondeado	Pequeña	Moderada	
	Zona pelágica de aguas medias (<400 m)	Pez de cuerpo redondeado	Pequeña	Pequeña	
	Capa superior de agua (<20 m)	Plancton	Moderada	Insignificante	
	Agua cerca de la costa (<10 m)	Arrecife de coral	Moderada	Insignificante	
Superficie del mar		Aves marinas/mamíferos marinos	Muy alta	Pequeña	
Costa	Sedimentos cerca de la costa	Algas	Moderada	Insignificante	
	Humedales	Organismos excavadores	Muy alta	Insignificante	
	Costas rocosas			Moderada	Insignificante
	Costas de arena			Moderada	Insignificante
Recursos socioeconómicos	Turismo costero		Muy alta	Pequeña	
	Pesquerías y acuicultura en la costa**		Alta	Pequeña	
	Pesquerías de aguas medias**		Pequeña	Moderada	
	Pesquerías de aguas profundas**		Insignificante	Alta	
	Tomas de agua marina		Muy alta	Pequeña	
	Recreación marítima		Muy alta	Pequeña	

* Las categorías de las consecuencias relativas toman en consideración una variedad de factores, incluida la sensibilidad de los hábitats, las especies o poblaciones, la extensión geográfica de una zona que puede ser afectada, el tiempo previsto de recuperación y el valor socioeconómico de un recurso, de aplicar.

** Es posible que las autoridades de las pesquerías impongan una prohibición precautoria o una exclusión para proteger los riesgos percibidos a la salud humana y la confianza del mercado. Generalmente, una prohibición continúa hasta que hay evidencia de que el consumo del pescado es seguro. Dichas prohibiciones pueden aumentar las consecuencias para las pesquerías a través de la pérdida forzada de los ingresos más que a través del impacto en las poblaciones de peces o stocks.

Paso 4: Seleccionar las mejores opciones

En el paso 4 del ABAN, los datos, los puntos de vista y las ventajas y desventajas se toman en cuenta para seleccionar la estrategia de respuesta óptima para el escenario planificado o para las condiciones predominantes del incidente. Esta etapa del ABAN depende de que los planificadores y los grupos de interés lleguen a un consenso acerca de las prioridades para la protección y las ventajas y desventajas aceptables.

El objetivo principal de la planificación y la ejecución de una respuesta es implementar aquellos métodos que, en cualquier momento, tengan el mayor beneficio neto. Por ejemplo, en un incidente marino costa afuera, el tratamiento o la recuperación de los hidrocarburos lo más cercano posible a la fuente tendrá el mayor beneficio, antes de que haya tenido oportunidad de meteorizarse y dispersarse haciendo a los otros métodos menos eficaces y aumentando las oportunidades de que más hidrocarburos lleguen a las zonas sensibles, fronteras internacionales o a la costa.

Los ejemplos de escenarios de descarga y las consideraciones del ABAN asociadas con la planificación de la respuesta se ofrecen en el Anexo de las páginas 57-64.

Normativa acerca del uso de dispersantes

El Proyecto conjunto del sector sobre respuesta ante derrames de hidrocarburos de IOGP-IPIECA ha publicado un informe titulado *Aprobación normativa de productos dispersantes y autorización para su uso* (IPIECA-IOGP, 2014) para ofrecer una visión general de los principios de la normativa acerca del uso de los dispersantes

Las normativas para los dispersantes se han dividido en las siguientes dos categorías:

1. **La normativa de productos dispersantes** que describe cuáles dispersantes serían aprobados para usarse en aguas nacionales.
2. **La normativa para la autorización del uso de dispersantes** que definen dónde y cuándo los productos dispersantes aprobados pueden ser autorizados para su uso en derrames de hidrocarburos en aguas nacionales.

Normativas para la aprobación de productos dispersantes para uso bajo la superficie del mar

Las mismas consideraciones para la aprobación del producto dispersante aplican a los dispersantes que se utilizan bajo la superficie del mar y sobre hidrocarburos flotantes, es decir:

- Un dispersante debe satisfacer o exceder un umbral de eficacia.
- Un dispersante no debe exceder un umbral máximo de toxicidad para la vida marina. Se debe tener cuidado al considerar la toxicidad del dispersante contra la toxicidad del hidrocarburo dispersado (dispersante más hidrocarburo). Al aprobar un dispersante para su uso, el umbral máximo de toxicidad de un posible dispersante se establece generalmente en:
 - un nivel en el que la mezcla de hidrocarburo y dispersante no sea más tóxico que el hidrocarburo solo a los mismos niveles de exposición; o
 - si el dispersante se prueba solo, a qué nivel es significativamente menos tóxico que un tóxico de referencia.

Nota: durante la autorización para el uso del dispersante, se deben considerar las preocupaciones acerca de la toxicidad del hidrocarburo dispersado (es decir, cuándo y dónde se puede permitir el uso del dispersante).
- Un dispersante debe ser fácilmente biodegradable y no contener ingredientes peligrosos persistentes. Esto puede requerir el suministro de información adicional como parte del proceso de aprobación del producto.

En el uso de dispersante bajo la superficie del mar en el incidente del Macondo se utilizaron los mismos dispersantes que se han empleado ampliamente en todo el mundo sobre hidrocarburos flotantes.

Normativas para la autorización del empleo de dispersantes para uso bajo la superficie del mar

A la fecha, EE. UU. es el único país que ha tenido experiencia en normativas para la inyección de dispersante bajo la superficie del mar como método de respuesta. Después del incidente del Macondo, el Equipo nacional de respuesta de EE. UU. publicó directrices acerca del monitoreo medioambiental para operaciones atípicas de dispersantes (NRT, 2013) y empezó el proceso de revisión del Plan nacional de Contingencias. El Instituto Americano del Petróleo (API, 2013) ha desarrollado un documento guía de monitoreo similar que se centra más hacia la recopilación de la información necesaria para tomar decisiones operativas respecto del uso continuo de SSDI.

Experiencia: el incidente del Macondo

La inyección de dispersante bajo la superficie del mar (SSDI) se utilizó por primera vez en la respuesta al incidente del Macondo frente al Golfo de México en 2010. Para comprender la razón fundamental para utilizar la SSDI es necesario considerar las circunstancias del incidente.

En la noche del 20 de abril de 2010, una descarga de gas y la posterior explosión y hundimiento ocurrieron en la plataforma petrolera Deepwater Horizon que trabajaba en el pozo de exploración Macondo en el golfo de México, aproximadamente a 42 millas (68 km) al sureste de Venice, Luisiana. A medida que la unidad de perforación se hundió, el conducto marino ascendente con la tubería de perforación que conecta la unidad con el preventor de reventones y el pozo debajo se separó de la plataforma Deepwater Horizon que se hundía y colapsó en el fondo del mar. El hidrocarburo y el gas continuaron fluyendo del conducto ascendente roto y asegurado (una tubería que anteriormente conectaba el cabezal del pozo en el lecho marino con la plataforma en la superficie del mar) después de que la plataforma Deepwater Horizon se había hundido.

El incidente involucró una falla bien integrada, seguida de una pérdida de control hidrostático del pozo. El preventor de reventones (BOP, por sus siglas en inglés) no selló el pozo después de las explosiones iniciales. Se emprendió un esfuerzo mayor para sellar y detener el flujo continuo de hidrocarburos y gas. Rápidamente inicio el trabajo de perforar dos pozos de alivio.

Dentro de días de ocurrido el incidente, el gobierno federal de EE. UU. estableció un comando de área unificada para gestionar la respuesta a la descarga de hidrocarburos. Se inició así la operación de respuesta a un derrame de hidrocarburos más grande de la historia. Se utilizó una gran variedad de métodos de respuesta a derrames de hidrocarburos para tratar de evitar que el hidrocarburo llegara a la costa, contaminando así los recursos ecológicos sensibles y alterando la economía local, en especial el turismo y las pesquerías. Los métodos de respuesta incluyeron:

- el uso a gran escala de skimmers para costa afuera y equipo de aguas someras para desnatar el hidrocarburo flotante;
- quema controlada in situ del hidrocarburo realizada por el Comando Unificado donde el clima, las condiciones del mar, la distancia desde la costa y otras condiciones lo hacían seguro y adecuado;
- dispersantes aplicado en diversas formas, y
- protección física de la costa, incluida la implementación de 3,8 millones de pies (1160 km) de barrera rígida y 9,7 millones de pies (2960 km) de barrera absorbente suave. Esto formó parte de un programa integral de respuesta en la costa.

Se selló el pozo el 10 de julio y la descarga de hidrocarburo y gas se detuvo el 15 de julio. El hidrocarburo y el gas habían fluido a las aguas del Golfo de México durante 87 días. En enero de 2015, la corte de distrito de EE. UU. determinó que no había forma de saber con precisión cuánto hidrocarburo se descargó en el Golfo de México, pero se encontró que la evidencia apoyaba un estimado de 3,19 millones de barriles (507.000 m³).

Descarga de hidrocarburos y gas bajo la superficie del mar en el pozo Macondo

Varias características de la descarga de hidrocarburo y gas que ocurrieron en el incidente del Macondo determinaron el destino del hidrocarburo. Algunos parámetros no se conocen con exactitud y algunos se convirtieron en objeto de mucha especulación y competencia jurídica; las diligencias aún continúan a la fecha de la preparación de esta guía. Otros hechos no se disputan y se conocen con certeza.

Después de que el Deepwater Horizon se hundió, la descarga de hidrocarburos y gas ocurría a una profundidad del agua de aproximadamente 5100 pies (1550 metros), donde la presión es de 150 atmósferas. Esto evitó la intervención humana directa por buzos para evaluar las tasas de descarga de los hidrocarburos y gas y cerrar el flujo. Por lo tanto, todas las operaciones bajo el nivel del mar se realizaron utilizando vehículos de operación

remota (ROV, por sus siglas en inglés). Las cámaras de video de los ROV implementados en el lecho marino pronto revelaron que el flujo de hidrocarburo y gas era continuo desde dos o tres lugares a lo largo del conducto ascendente roto y asegurado.

El hidrocarburo siguió llegando a la superficie del mar, y se intentaron una variedad de técnicas para retomar el control de la fuente del hidrocarburo y el gas y detener el flujo o contener y recuperar el hidrocarburo.

- El 7 de mayo, se implementó una ataguía, pero se formó hidrato de metano sólido dentro y aumentó la flotabilidad lo que lo hizo flotar y por lo tanto no se pudo colocar en posición sobre la fuga para recolectar el hidrocarburo.
- Un tubo conocido como RITT (herramienta de conducto ascendente de inserción) se insertó en el conducto ascendente roto el 14 de mayo para recolectar una parte del sobreflujo y recuperarlo hacia una embarcación en la superficie del mar. El RITT recolectó un promedio de 2000 barriles (320 m³) de hidrocarburo al día hasta que fue retirado para permitir las operaciones de "ahogo" (perforando fango bombeado entre el pozo).
- El 29 de mayo, la operación de "ahogo" no tuvo éxito y se hicieron preparaciones para proceder con el plan del sistema de contención Lower Marine Riser Package (LMRP).
- El conducto ascendente se cerró el 3 de junio y se colocó el sistema de contención LMRP/"sombbrero de copa". Este hidrocarburo y gas recuperado se envió por sifón a través de un conducto ascendente a la embarcación *Discover Enterprise* a una tasa de aproximadamente 15.000 barriles (2400 m³) diarios.
- Un segundo sistema de contención (múltiple bajo la superficie del mar) se anexó al BOP el 16 de junio y el hidrocarburo y gas recuperado se incendió por medio de la plataforma Q4000 a una tasa de aproximadamente 8500 barriles (1400 m³) diarios.
- Se selló el pozo y la descarga de hidrocarburo y gas se detuvo el 15 de julio.

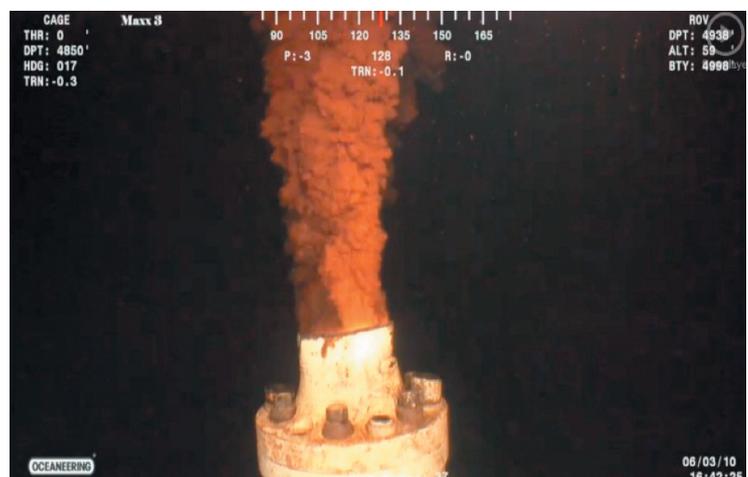
No fue posible medir las cantidades de hidrocarburo y gas que se liberaron a las profundidades del mar en el incidente del Macondo de momento. Se hicieron muchas estimaciones de la tasa de hidrocarburo y gas, tanto durante como después del incidente, pero las cantidades exactas no fueron seguras. Era obvio que una parte del hidrocarburo que se liberó alcanzó la superficie del mar debido a la mancha de hidrocarburo que continuaba formándose arriba del pozo cuando el sistema de SSDI no estaba en operación, y una parte del hidrocarburo continuaba alcanzando la superficie del mar cerca del lugar de la descarga (en un radio de algunos kilómetros) incluso cuando el sistema de SSDI estaba en operación.



Modificado del video de ROV de BP

Hidrocarburo y gas liberados del conducto ascendente roto el 11 de mayo de 2010

Abajo: hidrocarburos (petróleo y gas natural) escapando del extremo del conducto ascendente después de cortarse el 3 de junio de 2010 inmediatamente encima del dispositivo de sello del BOP del pozo Macondo



Modificado del video de ROV de BP

Las manchas y lustres de hidrocarburos en la superficie del mar que empezaron a disolverse y moverse a la deriva bajo los efectos de los vientos y corrientes predominantes. Sin embargo, las muestras de agua mostraron que una proporción del hidrocarburo liberado en la fuente no llegó posteriormente a la superficie del mar y se dispersó en la columna de agua, tanto por la energía de mezclado inherente de la descarga como por el sistema SSDI.

El hidrocarburo no se liberaba en forma de un chorro continuo de líquido. En vez de ello, y debido a la turbulencia creada por las condiciones de la descarga, el hidrocarburo y el gas se liberaban en el agua en forma de columna de pequeñas gotas de hidrocarburo y burbujas de gas. La distribución de tamaños de las gotas de hidrocarburo y las burbujas de gas producidas habrían estado en función de varios parámetros, entre ellos:

- las tasas de flujo del gas y el hidrocarburo, y la relación de gas-hidrocarburo;
- las presiones y temperaturas de los fluidos liberados (el pozo Macondo estaba siendo perforado en una cuenca de hidrocarburo y gas de alta presión y alta temperatura);
- el tamaño y la distribución de los orificios a través de los cuales el hidrocarburo y el gas estaban siendo liberados, y
- la presión y la temperatura del agua en la cual el hidrocarburo y el gas estaban siendo liberados.

Como se mencionó anteriormente, algunos de estos parámetros se conocen con certeza y precisión, pero otros solo se pueden estimar con mucha menos certeza o exactitud. Los estudios y el modelado realizados después del incidente del Macondo (por ejemplo, Socavamiento, 2012), además de las medidas tomadas al momento del incidente y en los meses posteriores (OSAT, 2010), confirmaron las características generales del comportamiento del hidrocarburo mostradas previamente en la Figura 4 de la página 18.

Uso de dispersantes en el pozo Macondo

Uso de dispersantes sobre hidrocarburos en la superficie del mar

El 22 de abril, se roció dispersante desde aeronaves por primera vez sobre hidrocarburos flotantes. Esto se realizó bajo la dirección del Coordinador Nacional en el Lugar del Incidente (FOSC, por sus siglas en inglés) y el uso del dispersante había sido autorizado previamente en el plan de contingencia para derrames de hidrocarburos del Equipo de Respuesta Regional (RRT, por sus siglas en inglés). Las aeronaves rociaron dispersante sobre el hidrocarburo fuera de una zona de exclusión de un radio de seguridad de cinco millas náuticas impuesta alrededor de las embarcaciones participantes en los esfuerzos de control de la fuente. El rociado de dispersante se realizó cerca de la fuente desde embarcaciones y botes. El objetivo era dispersar el hidrocarburo flotante en la columna de agua y también suprimir la acumulación de VOC en el aire de forma que el personal de respuesta no se expusiera a ellos.

A medida que creció la operación de respuesta a derrame de hidrocarburos, se usaron más aeronaves para rociar dispersante sobre el hidrocarburo flotante. La cantidad de dispersante rociado desde aeronaves durante una semana de la respuesta fue de 138.024 galones estadounidenses (522,5 m³) y la cantidad aumentaba rápidamente. A medida que continuaban las operaciones de respuesta, hubo una mayor preocupación acerca de la cantidad de dispersante que podría ser necesario para enfrentar las manchas en la superficie. Esto incluyó la inquietud acerca de la capacidad de producción y de comprar el volumen de dispersante que podría necesitarse, así como la inquietud acerca de los efectos potenciales de los dispersantes en el medio ambiente. Algunos trabajadores de la respuesta y miembros del público también expresaron preocupaciones acerca del potencial de que las personas se expusieran a los productos químicos o al hidrocarburo dispersado.

Consideraciones del uso de dispersantes bajo la superficie del mar

Se evaluaron más formas eficaces de usar dispersantes. Se consideró agregar dispersante bajo la superficie del mar, directamente al hidrocarburo a medida que se liberaba. La adición de dispersante bajo la superficie del mar podría tener varias ventajas posibles:

- Mejoraría la seguridad de la respuesta a derrames de hidrocarburos y los esfuerzos de controlar la fuente al reducir la cantidad de hidrocarburo en la superficie del mar. Esto reduciría la posible exposición del personal de respuesta en las embarcaciones de superficie a los VOC que se evaporaban del hidrocarburo.
- Reduciría la necesidad de contención y recuperación posteriores, la quema controlada in situ, el uso de dispersantes en superficie y la protección/tratamiento de la costa al reducir la cantidad de hidrocarburos flotantes.
- Produciría una tasa de encuentro mayor comparado con el rociado de dispersantes sobre el hidrocarburo flotante. El dispersante sería eficaz a bajas tasas de tratamiento y esto podría reducir la cantidad total del dispersante necesario para la respuesta.
- Posibilitaría continuar día y noche (24 horas al día, siete días a la semana) mientras que el dispersante solo se podría rociar desde aeronaves durante las horas de luz diurna.
- No se vería afectado por la mayoría de las inclemencias del clima y las condiciones del mar que podría evitar o limitar otros métodos de respuesta en el mar.

Sin embargo, también había mucha incertidumbre y preguntas acerca de la adición de dispersante bajo la superficie del mar, entre estas:

- Nunca antes se había realizado la adición de dispersante bajo la superficie del mar. ¿Funcionaría? Y de hacerlo, ¿cuáles serían las consecuencias?
- ¿Cuáles serían los efectos a largo plazo del uso de dispersantes bajo la superficie del mar?
 - ¿Cuáles serían los efectos de generar grandes cantidades de hidrocarburos dispersados cerca de la fuente durante largos periodos?
 - ¿Cómo podría realizarse un Análisis de Beneficio Ambiental Neto (ABAN) si el entorno bajo la superficie del mar no se había estudiado a profundidad?
- ¿Sucedería la biodegradación del hidrocarburo dispersado en el agua a bajas temperaturas y a profundidad considerable?
 - De ocurrir la biodegradación, ¿se agotaría el oxígeno a niveles muy bajos?

Prueba del uso de dispersante bajo la superficie del mar

Las autoridades reglamentarias (el Coordinador Nacional en el Lugar del Incidente (FOSC) para derrames de hidrocarburos y la EPA de EE. UU.) autorizaron a BP a realizar pruebas de este nuevo enfoque de aplicación de dispersante bajo la superficie del mar. El 30 de abril, del 2 al 4 y del 10 al 11 de mayo, se realizaron una serie de pruebas con cantidades limitadas de dispersante.

En el Recuadro 3 de la página 40 se presenta y se analiza una serie de fotografías tomadas durante las pruebas de inyección de dispersante bajo la superficie del mar del 9 al 12 de mayo. Aunque es difícil cuantificar con exactitud la cantidad total de hidrocarburo en la superficie del mar a partir de dichas fotografías, ofrecen una buena evidencia cualitativa del efecto del uso de dispersante bajo la superficie del mar. El fotógrafo pudo confirmar que la reducción observada en la expresión de hidrocarburo en la superficie se extendía más allá de la zona cubierta por las imágenes.

Recuadro 3 Evidencia visual de la eficacia de SSDI

<p>05/09/2010 - 8:52am CST Copyright 2010 Ocean Imaging Corp</p>	<p>9 de mayo, 08:52</p> <p>Esta fotografía fue tomada antes de la inyección de dispersante. El hidrocarburo flotante encima de la fuente de la descarga forma una capa continua. El hidrocarburo que se libera desde el conducto ascendente roto sube constantemente a través de la columna de agua para llegar a la superficie del mar.</p>
<p>05/10/2010 - 8:49am CST Copyright 2010 Ocean Imaging Corp</p>	<p>10 de mayo, 08:40</p> <p>La misma vista aérea tres horas después de iniciar la inyección del dispersante en el flujo de hidrocarburo y gas del extremo del conducto ascendente roto a través de un tubo guiado por el ROV.</p> <p>La zona de hidrocarburo flotante es claramente mucho menor que en la fotografía anterior. Una interpretación razonable es que la mayoría del hidrocarburo ya no estaba llegando a la superficie del mar.</p>
<p>05/10/2010 - 5:05pm @ 11 hrs. after start of subsurface dispersant injection Copyright 2010 Ocean Imaging Corp</p>	<p>10 de mayo, 17:05</p> <p>El hidrocarburo flotante después de once horas de inyectarse dispersante bajo la superficie del mar. Solo vestigios dispersos son visibles en la superficie del mar.</p> <p>La inyección de dispersante bajo la superficie del mar se detuvo entonces.</p>
<p>05/11/2010 - 9:18am CST Before last dispersant injection ended 5am Copyright 2010 Ocean Imaging Corp</p>	<p>11 de mayo, 09:10</p> <p>Esta fotografía fue tomada cinco horas después de detenerse la inyección de dispersante bajo la superficie del mar y muestra que la extensión del hidrocarburo flotante se había incrementado de manera significativa. Esto indicó que el hidrocarburo que se había inyectado previamente con dispersante bajo la superficie del mar estaba ahora alcanzando la superficie del mar.</p>
<p>05/12/2010 - 8:35am CST Copyright 2010 Ocean Imaging Not for public distribution</p>	<p>12 de mayo, 08:35</p> <p>Esta imagen fue tomada 28 horas después de detener la inyección de dispersante y muestra que la extensión del hidrocarburo flotante es similar a antes de que se probara la inyección bajo la superficie del mar, aunque el hidrocarburo ahora está a la deriva hacia el norte debido a cambios en el viento.</p>

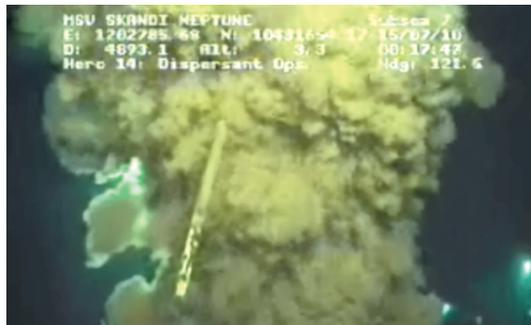
Derechos reservados de las imágenes de Ocean Imaging

Aplicación de dispersante bajo la superficie del mar

Método bajo la superficie del mar

Se inyectó dispersante en el flujo de hidrocarburo y gas del extremo del conducto ascendente roto mediante un tubo guiado por el ROV hasta el 3 de junio cuando se retiró el conducto ascendente roto. A continuación se agregó dispersante al flujo de hidrocarburo y gas del cabezal del pozo y después el LMRP, hasta que el flujo de hidrocarburo cesó el 15 de julio.

Se agregó el dispersante por medio de una lanza o vara sostenida por el ROV y guiada por el operador del ROV. Las transmisiones de video en vivo mostraron que la lanza se movía alrededor entre la descarga de hidrocarburo y gas, además, que se incorporaba agua en la columna a unos pocos pies (alrededor de 1 m) sobre el cabezal del pozo o LMRP. Se intentó con lanzas o varas de diferentes configuraciones para agregar dispersante (ver fotografías a la derecha).



Modificado del video de ROV de BP

Tasa de tratamiento de dispersantes bajo la superficie del mar

Debido a que se desconocían tasas de flujo de hidrocarburo y gas y que no podían medirse, no fue posible especificar una tasa de tratamiento por dispersante en términos de la relación de dispersante:hidrocarburo (DOT, por sus siglas en inglés) que se debiera alcanzar. En las fases tempranas de las pruebas del sistema SSDI en mayo de 2010, se agregaron dispersantes a tasas que variaban de un promedio de 4,6 a 10 galones por minuto (17,4 a 37,9 l/m).

Se realizaron pruebas para determinar la tasa de aplicación más eficaz dentro el rango probado, y para evaluar si la adición de dispersante bajo la superficie del mar podría reducir la cantidad total de dispersante que se requeriría para la respuesta. Estas pruebas tomaron en cuenta si la adición de dispersante directamente al hidrocarburo fluyendo fuera del cabezal del pozo sería eficaz y si esto podría ser eficaz usando un volumen de dispersante sustancialmente menor que lo que el equipo aéreo estaba rociando sobre hidrocarburos flotantes esparcidos en una base diaria. Estas pruebas demostraron que la aplicación bajo la superficie del agua podía evitar que el hidrocarburo alcanzara la superficie del mar por encima y en la cercanía del pozo. Sin embargo, la tasa de aplicación probada no fue suficiente para dispersar todo el hidrocarburo bajo la superficie del mar. Cierta cantidad de hidrocarburo parcialmente degradado y envejecido continuó llegando a la superficie del mar a varios kilómetros de distancia del pozo, mientras que el rociado de dispersante desde aeronaves continuaba para enfrentar ese hidrocarburo en la superficie.

El 26 de mayo, la EPA de EE. UU. y la Guardia Costera de EE. UU. (USCG), emitió una directiva (US EPA, 2010a) exigiendo que el volumen total de dispersante aplicado (sobre el hidrocarburo en la superficie y bajo el nivel del mar) se redujera a un 75% de la cantidad máxima diaria empleada. La directiva ordenó a la parte responsable detener el uso de dispersantes en superficie en ausencia de una autorización previa por escrito de la USCG. Permitió continuar el uso de dispersante bajo la superficie del mar, pero solo a un máximo de 15.000 gal/día, equivalente a 10,4 gal/min (39,4 l/min, equivalente a 357 barriles de dispersante/día).

Cantidad de dispersante usado

Un total de un poco más de 1,8 millones de galones (alrededor de 7000 m³) de dispersante se utilizó durante la respuesta al incidente del Macondo.

Más del 40% (771.272 galones o 2920 m³) de la cantidad total de dispersante se inyectó bajo la superficie del mar.

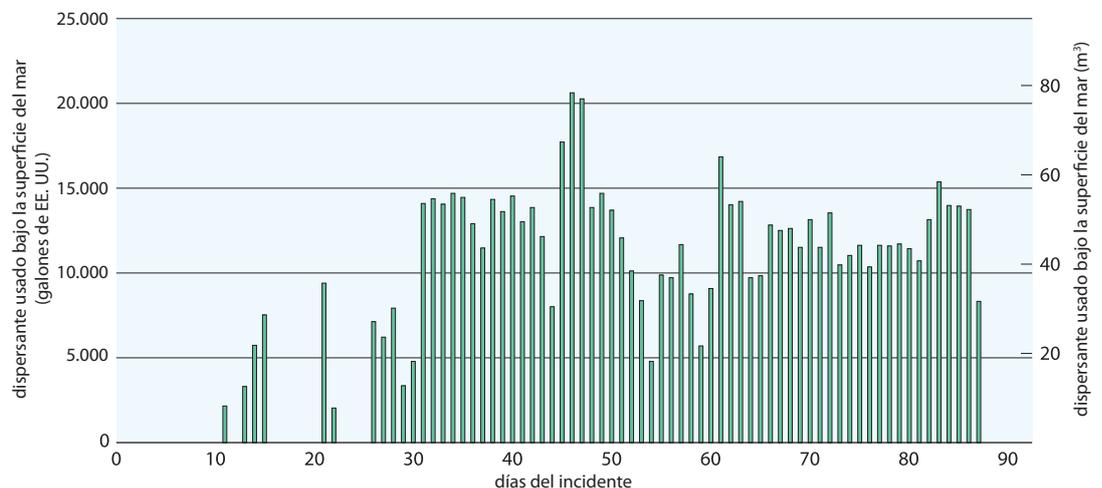
Tabla 9 Dispersante usado en el incidente del Macondo

Dispersante usado	Galones de EE. UU. (al mil más cercano)	m ³
Rociado desde aeronaves	976.000	3.700
Rociado desde embarcaciones	94.000	360
Aplicado bajo la superficie del mar	771.000	2.920
Totales	1.841.000	6.980

Después de las aplicaciones de prueba realizadas a finales de abril y durante mayo, la cantidad diaria de dispersante usado bajo la superficie del mar aumentó a 15.000 galones/día (55 m³/día) con una tasa promedio de bombeo de dispersante de 10 galones/min (37,9 l/min) (Figura 6). Los datos de la Tabla 9 y la Figura 6 se derivan de los informes diarios publicados por BP en su sitio web del incidente.

Después de la directiva de la EPA del 26 de mayo, hubo una reducción sustancial en el volumen diario promedio de dispersante utilizado en la respuesta al incidente. Algunos días, se prohibió el rociado de dispersantes en superficie y se autorizó a volúmenes diarios sustancialmente menores en otros días cuando fue necesario. Del 3 al 5 de junio, al momento en que el conducto ascendente se retiró y se instaló el LRMP, la tasa de aplicación de dispersante bajo la superficie del mar se incrementó brevemente a 20.000 galones/día (76 m³/día), equivalente a 14 galones/min. En otras ocasiones, el uso diario de dispersante bajo la superficie del mar continuó a una tasa promedio que varió entre aproximadamente 8000 a 15.000 galones/día (de 30 a 55 m³/día), equivalente a 6 a 10,4 galones/min (de 22,7 a 39,4 l/min), hasta que cesó el flujo el 15 de julio.

Figura 6 Aplicación de dispersante bajo la superficie del mar durante el incidente del Macondo



Requisitos de monitoreo de la columna de agua

Antes del incidente del Macondo, nunca se había intentado el uso de dispersante bajo la superficie del mar como un método de respuesta a derrames de hidrocarburos, y el uso de dispersantes en tales grandes cantidades como respuesta era algo sin precedente. Se exigió el monitoreo de la columna de agua para abordar preguntas y preocupaciones acerca del uso de dispersante bajo la superficie del mar, a saber:

- ¿Funcionaría la adición de dispersante a la descarga de hidrocarburo y gas bajo la superficie del mar?
- En caso de funcionar la adición de dispersante bajo la superficie del mar, ¿cuáles serían las consecuencias?
 - ¿A dónde se transportarían las columnas de hidrocarburos dispersados por las corrientes predominantes?
 - ¿Cuáles serían las concentraciones de hidrocarburo dispersado en estas columnas?
 - ¿Podrían estas concentraciones de hidrocarburos dispersados provocar daño a los organismos marinos expuestos a ellos?
 - ¿Ocurriría la biodegradación del hidrocarburo dispersado en aguas frías y profundas?
 - En caso de ocurrir la biodegradación, ¿agotaría el oxígeno del agua a niveles muy bajos y causaría daño a los organismos marinos?

La EPA de EE. UU. Exigió monitorear el dispersante bajo la superficie del agua durante la respuesta para indicar la eficacia en general del dispersante agregado. También deseaban tener indicaciones del transporte del hidrocarburo dispersado en la columna de agua.

El 10 de mayo, la EPA de EE. UU. Emitió una directiva (EPA, 2010b) estableciendo un plan de monitoreo de tres partes requerido proceder con el uso de dispersante bajo la superficie del mar. La parte 1 del monitoreo requería indicar si el uso de dispersante bajo la superficie del mar estaba siendo exitoso, es decir, la dispersión del hidrocarburo bajo la superficie del mar, y empleó:

- el uso de un fluorímetro remolcado (fluorímetro C3 de Turner Designs) utilizado a 1 m de profundidad para medir las concentraciones de hidrocarburo en el agua;
- análisis del tamaño de partícula usando un analizador de dispersión y transmisometría láser (LISST, por sus siglas en inglés) (Sequoia Scientific, Inc.) a diferentes intervalos desde la superficie hasta una profundidad del agua de 550 m para medir la distribución del tamaño de las gotas de hidrocarburos;
- medidas del oxígeno disuelto a diferentes intervalos desde la superficie hasta una profundidad del agua de 550 m para detectar cualquier agotamiento de oxígeno debido a la biodegradación del hidrocarburo;
- uso de un dispositivo CTD para medir la conductividad, la temperatura y la profundidad a diferentes intervalos desde la superficie del agua hasta una profundidad del agua de 550 m;
- muestras de agua desde la superficie hasta una profundidad del agua de 550 m para el análisis de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH, por sus siglas en inglés), y
- observación visual aérea (cuando el clima lo permite).

La parte 2 del monitoreo se exigió cuando la parte 1 indicó que el uso del dispersante bajo la superficie del agua estaba siendo eficaz. Esto extendió el monitoreo exigido de la parte 1 se emprendiera hasta el fondo del mar a una profundidad del agua de 1500 m. Además, se agregaron algunos monitoreos adicionales:

- lanzar (es decir, descender, no remolcar) mediciones de fluorímetro desde la superficie hasta el fondo del mar;
- Prueba de toxicidad Rototox™, y
- Prueba de fluorescencia UV para detectar fracciones PAH de alto peso molecular (>3 anillos).

La Parte 3 delineó los procedimientos operativos para la inyección del dispersante en la subsuperficie e incluyó parámetros tales como los tipos de dispersante a usar, la velocidad de inyección de dispersante, cómo se monitorizaría la velocidad de bombeo y los procedimientos del FOSC para iniciar y detener la inyección.

La adición del requisito de realizar pruebas de toxicidad de Rototox™ fue para evaluar el riesgo que plantea SSDI en su forma temprana y determinar si el proceso de SSDI se debe detener o alterar para reducir el riesgo de daño a especies marinas. Se especificaron tres umbrales:

1. Una reducción significativa en el oxígeno disuelto desde la base a menos de 2 mg/l, o
2. Esfuerzo excesivo de una respuesta tóxica, revelado por las pruebas de toxicidad.

De no alcanzarse ninguno de los umbrales, y tomando en cuenta todos los factores pertinentes incluida la costa, el agua de superficie y otros impactos a la salud humana y a la ecología, los organismos gubernamentales habrían considerado que el riesgo de la aplicación de dispersante bajo la superficie del mar superaba sus beneficios potenciales y si el sistema SSDI debía modificarse o cancelarse.

Los requisitos de monitoreo fueron posteriormente modificados para incluir el monitoreo de las aguas no afectadas para ofrecer datos de base y un conjunto combinado de CTP y muestreo de agua¹.

Resultados del monitoreo

El monitoreo y el muestreo de la columna de agua realizado fue diseñado para revelar:

- indicaciones medibles de la eficacia de la adición de dispersante bajo la superficie del agua, como la ubicación y las concentraciones de hidrocarburos dispersados en columnas bajo la superficie del mar, pero también:
- los posibles riesgos y consecuencias adversas del uso de dispersante bajo la superficie del mar tales como una respuesta tóxica en los organismos de prueba, una disminución importante en el contenido del oxígeno disuelto en el agua.

Los resultados del monitoreo y el muestro del agua realizados se resumieron y se incluyeron en un informe preparado para el Comando Unificado titulado *Informe resumen para la detección de hidrocarburos y dispersante bajo el nivel del mar y en la subsuperficie: Muestro y monitoreo*, a menudo denominado OSAT1 (OSAT, 2010). Este informe presenta los resultados de más de 10.000 muestras de 25 embarcaciones de investigación en más de 125 cruceros y 850 días-barco en el mar. OSAT1 incluye un resumen de los datos recopilados en el proceso de SSDI, pero no trata acerca de SSDI. Informa acerca de los resultados del muestreo de agua para determinar si las actividades de respuesta en el agua son completas. Permitió al FOSC cambiar su enfoque hacia la respuesta en la costa y en áreas mareales a lo largo de la costa.

Los datos de la Figura 7 fueron tomados de un informe preparado por el Grupo de Análisis Conjunto (JAG, por sus siglas en inglés) para Surface and Sub-Surface Oceanography, Oil and Dispersant Data (JAG, 2010a) y son ejemplos de las medidas hechas durante el monitoreo de la columna de agua a diferentes momentos, fechas y lugares. La figura muestra:

- la respuesta de fluorímetro, fluorescencia (ppb QSDE: equivalencia de quinina sulfato dehidrato) en negro;
- el contenido del oxígeno disuelto del agua (ml/l) en rojo, y
- las anomalías en la densidad del agua (kg/m³) en azul.

Las cifras son datos sin procesar y solo se utilizan para ilustrar los resultados obtenidos durante el monitoreo.

¹ El diseño más común para un conjunto de muestro de agua, que generalmente incluye de 12 a 36 botellas de muestreo, va generalmente de 1,2 a 30 litros de capacidad, agrupados alrededor de un cilindro central donde el CTD o un paquete de sensores similar puede ser conectado.

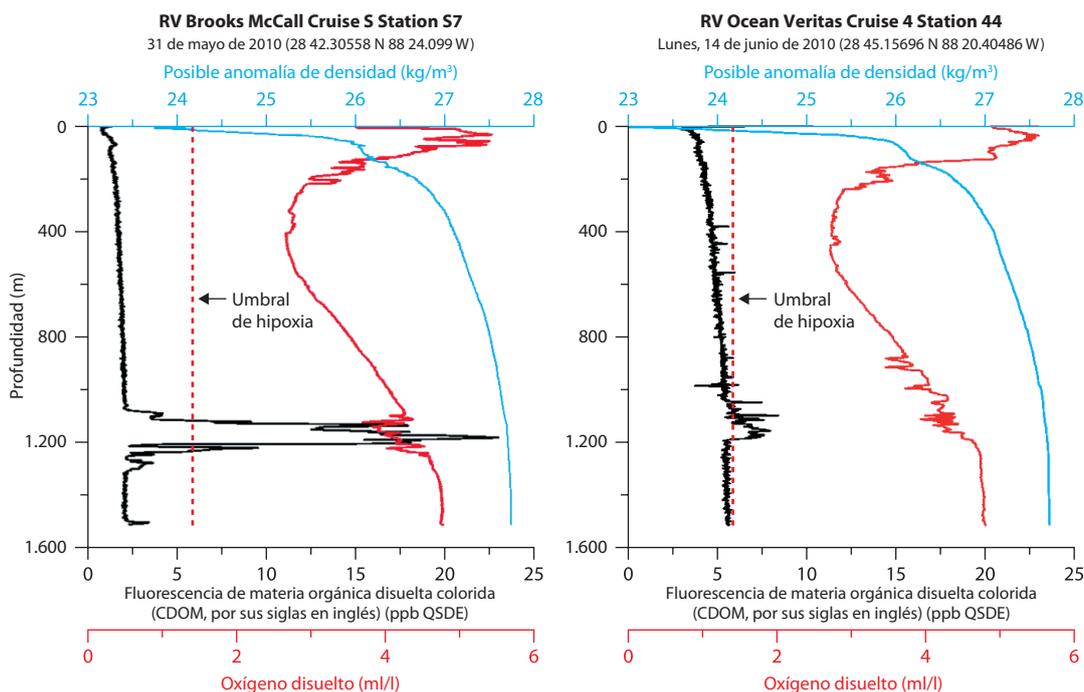
Mediciones de fluorimetría y análisis químico del agua

De acuerdo al informe de JAG, el hidrocarburo dispersado (incluido tanto el hidrocarburo físicamente dispersado por la turbulencia de las condiciones de la descarga como el hidrocarburo dispersado como resultado de la dispersión mejorada químicamente provocada por la adición de dispersante bajo la superficie del mar) se detectó por fluorimetría como una columna diluida de hidrocarburo dispersado a una profundidad de agua de aproximadamente 1200 m, es decir, 300 m sobre la descarga de hidrocarburo y gas. Las lecturas fueron más altas cerca del sitio de la descarga, generalmente disminuyendo con la distancia, y con una tendencia principal del suroeste al noreste coherente con la corriente medida del agua (JAG, 2010a).

En un informe posterior de JAG (JAG, 2012) se concluyó que:

- El hidrocarburo detectado se clasificó en hidrocarburos de fracción volátil (parcialmente hidrosolubles) e hidrocarburos de fracción semivolátil. El informe independiente de estas dos clases de hidrocarburos permitió distinguir las diferencias en el destino de estas fracciones observadas temprano en el derrame. Algunas evidencias demuestran que las fracciones de hidrocarburo que son más fácilmente biodegradadas, las fracciones volátiles de los hidrocarburos, eran consumidas con preferencia.
- Las disminuciones observadas en las concentraciones de hidrocarburos a mayor distancia del cabezal del pozo se debieron probablemente a varios factores, principalmente a dilución y biodegradación; otros factores, como la adsorción de partículas, podrían haber contribuido a la disminución.
- La mayor concentración de hidrocarburos volátiles detectados en el agua entre profundidades de 900 y 1300 m fue de 2112 partes por cada mil millones (ppb) encontradas en una muestra a 1,2 km de distancia del cabezal del pozo. Más allá de los 20 km del cabezal del pozo, las concentraciones de hidrocarburos volátiles fueron de menos de 100 ppb y los valores a más de 100 km del cabezal del pozo fueron menores a los niveles de detección del método analítico.
- Los niveles de las fracciones semivolátiles de hidrocarburos a profundidades entre 900 y 1300 m fueron principalmente en el rango de 1 a 10 ppb a distancias de >10 km del pozo. El mayor nivel de hidrocarburos el nivel de hidrocarburo en una muestra de agua fue de 485 ppb, también encontrado en una muestra a

Figura 7 Ejemplos de las diferentes mediciones realizadas durante el monitoreo de la columna de agua



1,2 km del cabezal del pozo. Se encontraron cantidades de hidrocarburos semivolátiles a 400 km del cabezal del pozo; valores superiores a los 10 ppb se encontraron hasta alrededor de 275 km del cabezal del pozo.

Mediciones de oxígeno disuelto

El contenido de oxígeno disuelto del agua se agotó a cierto grado en la cercanía de la columna de hidrocarburo dispersado, pero la operación de dispersante bajo la superficie del mar no generó ninguna zona de agotamiento de oxígeno que pudiera dañar a los organismos marinos.

Muestreo de la columna de agua y resultados de los análisis

Se recogieron muestras de agua en los lugares donde la fluorimetría había indicado las mayores concentraciones de hidrocarburos dispersados, y se analizaron estas muestras de agua en búsqueda de hidrocarburos específicos.

Puntos de referencia para la salud humana

Los puntos de referencia para la salud humana desarrollados por la EPA de EE. UU. En coordinación con el departamento de salud y servicios humanos de EE. UU. Se utilizan para evaluar los posibles riesgos a la salud humana de la exposición al agua contaminada por hidrocarburos. El punto de referencia consta de niveles de análisis para una cantidad de compuestos, incluidos los VOC, los PAH y los metales.

Se analizó un total de 11.634 muestras (6090 cerca de la costa, 750 costa afuera y 4794 en aguas profundas) para comparación con los puntos de referencia para la salud humana. Ninguna de las muestras excedió los puntos de referencia de la EPA.

Puntos de referencia de la vida acuática

La EPA estableció puntos de referencia "niveles de preocupación" para las concentraciones de PAH en el agua y sedimentos para analizar los diversos impactos posibles en la vida acuática. Se analizaron las muestras de agua para un total de 41 compuestos químicos, incluidos 7 compuestos orgánicos volátiles, 16 PAH padres y 18 homólogos alquilados de los PAH padres. Ocho de los compuestos químicos individuales se asignaron a la toxicidad potencial de forma que la toxicidad acumulada (aguda o crónica) de la mezcla de compuestos de cada muestra se pudiera calcular. Estos puntos de referencia para la vida acuática se establecieron sobre la base de un conjunto de evaluaciones de toxicidad de laboratorio usando agua contaminada y varias especies, etapas de vida, criterios de valoración final y duraciones de la exposición.

Se analizó un total de 10.578 muestras (6090 cerca de la costa, 749 costa afuera y 3739 en aguas profundas) para comparación con los puntos de referencia para la vida acuática. Como se ha informado (OSAT, 2010 y OSAT, 2011), aproximadamente el 1% del total de muestras fue coincidente con el hidrocarburo del Macondo y por encima de los puntos de referencia de la EPA de EE. UU., con el 1% de lugares de sedimento y <1% de lugares de agua.

Puntos de referencia de dispersante

Se analizaron las muestras de agua para detectar cuatro ingredientes de dispersantes:

- 2-butoxietanol (únicamente encontrado en COREXIT® 9527 que se utilizó hasta mayo cuando se agotó el suministro);
- dipropil glicol n-butil éter (DPnB);
- propil glicol; y
- di-iso-octilsulfosuccinato (DOSS).

Los puntos de referencia, basados en concentraciones de agua salina disuelta de compuestos individuales, se utilizaron para establecer los “niveles de preocupación” basados en los datos de los efectos biológicos disponibles y se diseñaron conservadoramente para proteger la vida acuática.

Se analizó un total de 10.178 muestras (5.262 cerca de la costa, 682 costa afuera y 4.334 en aguas profundas) para comparación con los puntos de referencia de los dispersantes. Como informó la OSAT, no se observaron excedentes.

Prueba de toxicidad

Las pruebas de laboratorio realizadas usando los protocolos estándar Rototox™ y el petróleo crudo del Macondo dispersado con COREXIT® 9500A indicaron que el valor de la CL_{50} para el rotífero, *B. plicatilis* era en el rango de 10 a 17 ppm. Los mayores valores observados de hidrocarburos totales del petróleo (TPH, por sus siglas en inglés) en el campo donde se realizaron las pruebas de toxicidad fueron considerablemente menores que este. Por lo tanto, no es sorprendente que no se reveló ningún signo de respuesta tóxica en la prueba de toxicidad Rototox™ realizada como parte 2 del monitoreo del agua que se exigió.

Además, los niveles de toxicidad también se realizaron en varias especies bentónicas y pelágicas (Tabla 10).

Tabla 10 Pruebas realizadas en varias especies bentónicas y pelágicas durante el incidente del Macondo

Tipo de muestra	Tipo de prueba	Duración	Criterio de valoración final	Cantidad de pruebas
Agua	Pez	96 horas	Supervivencia	126
		7 días	Supervivencia, crecimiento, biomasa	36
	Camarón mísido	96 horas	Supervivencia	93
		7 días	Supervivencia, crecimiento, fecundidad, biomasa	30
	Camarón rosado	7 días	Supervivencia	88
	Erizo de mar	2 horas	Fertilización	2
	Molusco	48 horas	Supervivencia, desarrollo de embriones	20
	Diatomea	96 horas	Crecimiento	68
	Alga	96 horas	Crecimiento	68
Sedimento	Anfípodo	96 horas	Supervivencia, crecimiento	74
		10 días	Supervivencia, crecimiento, reentierro	505
	Lombriz	10 días	Supervivencia	112
	Mísido	48 horas	Supervivencia	256
		96 horas	Supervivencia, crecimiento	65
	Erizo de mar	60 minutos/ 48 horas	Fertilización/desarrollo de embriones	66

Fuente: OSAT, 2011

Se realizó un total de 3548 pruebas de toxicidad durante el derrame y la respuesta asociada, lo que lo convirtió en el programa de pruebas más extenso que se haya realizado para describir los efectos de un derrame de hidrocarburos en el medio ambiente marino. En promedio, el 90% de estas pruebas no mostraron efectos de importancia estadística. No se encontró que ninguna de las concentraciones de ingredientes relacionados con los dispersantes en las muestras de sedimento y aguare colectadas después del 3 de agosto de 2010 en la zona cerca de la costa excediera los puntos de referencia acuáticos crónicos de la EPA de EE. UU. (OSAT, 2011).

Abordar las preocupaciones acerca de los mariscos

Para abordar las preocupaciones acerca de los posibles efectos del hidrocarburo y los dispersantes en los mariscos, en junio de 2010 la Administración nacional oceánica y atmosférica (NOAA) y la Administración de alimentos y medicamentos (FDA) en consulta con la EPA de EE. UU. Y los estados del Golfo acordaron un procedimiento extenso de muestreo y prueba. Se reabrieron las zonas una vez cerradas únicamente cuando todos los mariscos muestreados en la zona aprobaron tanto la prueba sensorial establecida como la prueba química. Aunque la prueba inicial se centró en los contaminantes de los hidrocarburos, en octubre de 2010, la FDA y la NOAA crearon una nueva prueba que podría detectar vestigios de ingredientes de los dispersantes en el tejido de peces (US FDA, 2010). Todas las muestras probadas estuvieron muy por debajo de los niveles de preocupación de la FDA, y el 99% de las muestras no mostró ningún residuo detectable.

A la fecha, ninguno de los mariscos probados por la FDA, la NOAA y los estados del Golfo ha superado los umbrales para la salud humana de la FDA. Los mariscos del Golfo de México están entre las fuentes de mariscos más rigurosamente probadas del mercado estadounidense. Desde mayo de 2010, la FDA, la NOAA y los estados del golfo han probado más de 10.000 muestras de peces de aleta y mariscos, y los niveles de PAH en los mariscos en las pruebas han resultado consistentemente de 100 a 1000 veces menores que los umbrales de preocupación de la FDA (US FDA, 2012).

Evaluación de daños a los recursos naturales

En Estados Unidos, la Ley de contaminación del petróleo de 1990 aborda los impactos medioambientales de los derrames a través de dos tipos de actividades:

- **Respuesta:** las medidas adoptadas para contener y eliminar el hidrocarburo del agua y de la costa, y minimizar el daño a la salud y el bienestar públicos.
- **Restauración:** las medidas adoptadas para restaurar o reemplazar los recursos naturales dañados y compensa a la población por la pérdida temporal del uso de estos recursos.

Los científicos que trabajan en las respuestas y las medidas de evaluación y restauración de los recursos naturales estuvieron en el campo en cuestión de días después de ocurrido el incidente, recopilando datos que se usarían para evaluar el impacto potencial del hidrocarburo y los dispersantes en la vida silvestre y los hábitats, así como la pérdida de uso recreativo de estos recursos. Este fue el inicio de la Evaluación de los Daños a los Recursos Naturales (NRDA, por sus siglas en inglés), la evaluación más amplia de dichos recursos que se haya realizado. Para principios de 2015, los científicos de la NRDA habían realizado más de 240 estudios, incluidas las investigaciones de los posibles impactos bentónicos. Al momento de la preparación de esta guía, el análisis de los datos y la evaluación del potencial de daños aún estaban en curso.

Aspectos operativos: aspectos generales

Las operaciones básicas del uso de dispersante bajo la superficie del mar son las siguientes:

- Se utiliza una embarcación en superficie para transportar un suministro de dispersante y el equipo necesario para la aplicación al sitio de la descarga de hidrocarburos bajo la superficie del mar.
- Se implementa el equipo y, de ser posible, se realiza el monitoreo bajo la superficie del mar para identificar la descarga de hidrocarburos bajo la superficie del mar.
- Se bombea el dispersante desde la superficie a un múltiple bajo la superficie del mar. Se conecta un puente desde el múltiple a una boquilla sostenida por un vehículo de operación remota (ROV, por sus siglas en inglés) ubicado cerca de la descarga.
- El ROV coloca la boquilla para inyectar el dispersante directamente entre el flujo de hidrocarburo lo más cercano posible al punto de la descarga.
- Se bombea el dispersante a una tasa fija desde la cubierta de la embarcación en superficie a través de la boquilla y entre el hidrocarburo.
- Se monitorea el uso de dispersante bajo la superficie del mar para evaluar su eficacia y ofrecer información acerca de las ubicaciones de columnas de hidrocarburo dispersado en la columna de agua y su posible riesgo a los organismos marinos.

Equipo necesario

El primer paso es movilizar el equipo necesario al lugar de control de la fuente en el pozo. En la Tabla 11 se presenta un ejemplo de lista de verificación de preparación para ayudar a movilizar los recursos adecuados.

Tabla 11 Ejemplo de lista de verificación de preparación para la inyección de dispersante bajo la superficie del mar

Tipo de recurso	Équipements, fournitures ou autres articles spécifiques
Embarcación	<ul style="list-style-type: none"> ● Embarcación de construcción para costa afuera para transporte e implementación del sistema de inyección de dispersante bajo la superficie del mar, y embarcación(es) para transporte de suministro de dispersante para transportar el suministro de dispersante
Suministros de productos químicos	<ul style="list-style-type: none"> ● Dispersante
Equipo operativo	<ul style="list-style-type: none"> ● Varios ROV para asistir en la instalación/operación ● Unidad de embobinado de tubería ● Múltiple bajo la superficie del mar ● Sistema de bombeo de dispersante ● Manguera y equipo de embarcación a embarcación para reabastecimiento de los tanques de almacenamiento de dispersante
Equipo para monitoreo de dispersante bajo la superficie del mar	<ul style="list-style-type: none"> ● Embarcación de investigación ● Instrumentación especializada para realizar monitoreo de la operación de inyección de dispersante bajo la superficie del mar ● Equipo científico para apoyar la operación de monitoreo
Procedimientos	<ul style="list-style-type: none"> ● Procedimientos de instalación/operación personalizados para la embarcación o las embarcaciones de respuesta
Planificación/procedimientos	<ul style="list-style-type: none"> ● Plan de implementación del dispersante (tanques ISO a la embarcación) ● Planes de inyección de dispersante (relación de flujo de hidrocarburo a inyección de dispersante o DOR, por sus siglas en inglés) ● Plan de transferencia para reabastecer las operaciones de bombeo ● Plan de monitoreo de dispersante ● Planificación para contingencias para la instalación
Planificación	<ul style="list-style-type: none"> ● Plan de acopio/secuencia para la llegada de tanques de dispersante a la base en la costa ● Aseguramiento de que en los acuerdos del flete de la embarcación se incluya dispersante
Acuerdos	<ul style="list-style-type: none"> ● Acuerdo con el proveedor de dispersante para la adquisición de dispersante adicional

Cortesía de MWCC

Reservas de dispersante

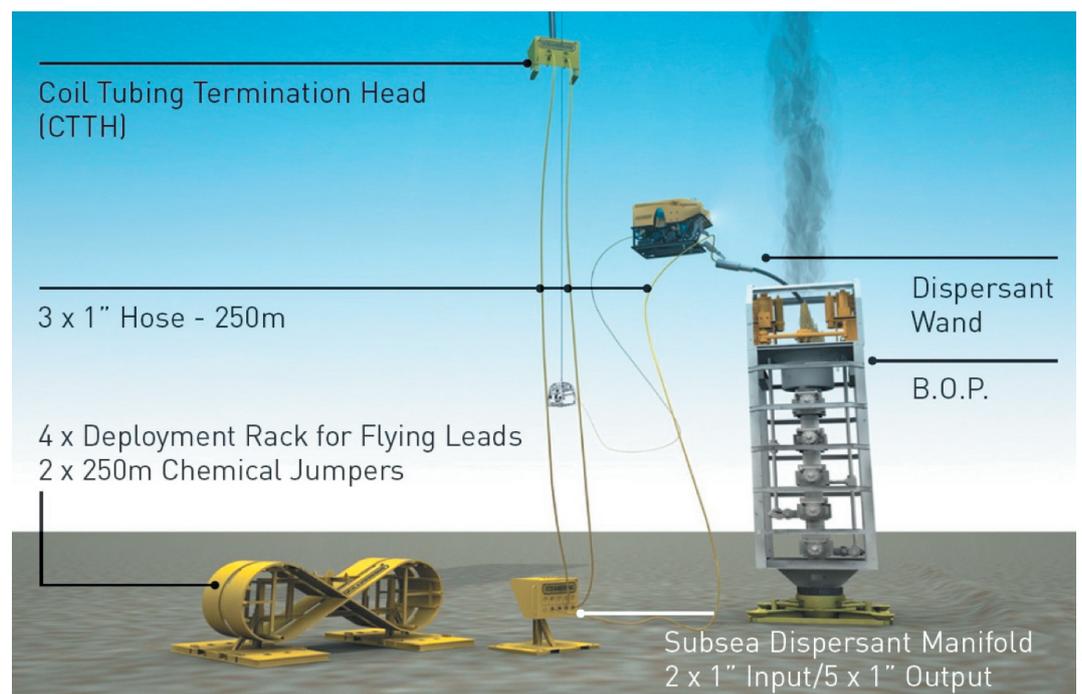
En todo el mundo se mantienen reservas de dispersante como parte de la reserva mundial de dispersantes (GDS, por sus siglas en inglés) de Oil Spill Reserve Limited (OSRL) de 5000 m³ (o 5 millones de litros) de dispersante. Las reservas están ubicadas para permitir un acceso rápido a los dispersantes y asegurarse de que sea posible movilizar una cantidad suficiente para un incidente individual de respuesta a un derrame. El acceso al GDS está disponible a todos los miembros de la OSRL que firman el acuerdo complementario sobre GDS. Otras organizaciones de respuesta como la Marine Well Containment Company (MWCC) en el Golfo de México y el Australian Marine Oil Spill Centre (AMOSC) en Australia también han desarrollado reservas de dispersantes especiales para sitios.

Implementación de equipo para SSDI

Una vez que el equipo para SSDI llega al sitio del área de control de la fuente, la embarcación de suministro de dispersante se posiciona en la superficie sobre el cabezal del pozo. Debido a que pueden ocurrir otras operaciones cerca del cabezal del pozo (por ejemplo, actividades de sellado y contención, eliminación de desechos, perforación de pozo de alivio, etc.), todas las embarcaciones y actividades se deben coordinar cuidadosamente a través de un sistema de comando central conocido como comando de Operaciones simultáneas (SIMOPS). El SIMOPS existe para coordinar todas las actividades en la superficie del océano y bajo la superficie del mar para garantizar la seguridad de todas las embarcaciones que están operando en la cercanía.

Después de que la embarcación se ha posicionado, se conectan las mangueras de dispersante de superficie a los tanques de suministro de dispersante. A continuación, se implementan el múltiple de dispersante y las pesas con la tubería enrollada de la embarcación. Se utilizan ROV para conectar los diferentes componentes del sistema de inyección de dispersante bajo la superficie del mar.

Figura 8 El conjunto de herramientas SWIS de respuesta inicial



Una vez que está ensamblado totalmente y verificado, el ROV inserta el aplicador de dispersante (o la vara de aplicación) entre la columna del flujo de hidrocarburo. Un segundo ROV ayuda al primero ofreciendo iluminación y videovigilancia en el fondo del mar. Una vez que la vara de aplicación se encuentra colocada en su lugar, se inicia el bombeo de dispersante desde la embarcación de dispersante. Se ajustan la tasa de bombeo y la operación de dispersante para maximizar la eficacia del dispersante, de la forma indicada por el monitoreo operativo in situ.

El tiempo de movilización y ensamblaje descrito anteriormente típicamente requerirá de varios días. Sin embargo, una vez que está operando, el sistema puede mantenerse 24 horas al día debido a que no está restringido a la luz diurna ni a nada que no sean inclemencias climáticas en superficie. Incluso entonces, es posible implementar un sistema de bombeo de dispersante autocontenido en el fondo del mar que podría funcionar sin ninguna intervención humana desde la superficie. Uno de dichos sistemas fue desarrollado por MWCC y es conocido como sistema Autónomo para Inyección de Dispersante bajo la Superficie del Mar (SADI, por sus siglas en inglés). El sistema SADI podría utilizarse para proporcionar la SSDI en caso de que fuera necesario evacuar de emergencia al personal del sitio. Consta de una vejiga de almacenamiento de dispersante, múltiple y sistema de bomba de inyección que se puede accionar automáticamente sin apoyo de una embarcación en superficie.

Tasa de tratamiento de dispersantes bajo la superficie del mar

La tasa de tratamiento de dispersante depende de las circunstancias precisas de la descarga de hidrocarburos. A menudo se expresa como una relación dispersante:hidrocarburo (DOR, por sus siglas en inglés), siendo el dispersante requerido para producir un incremento significativo en la proporción de gotas de hidrocarburo que son lo suficientemente pequeñas para dispersarse en la columna de agua.

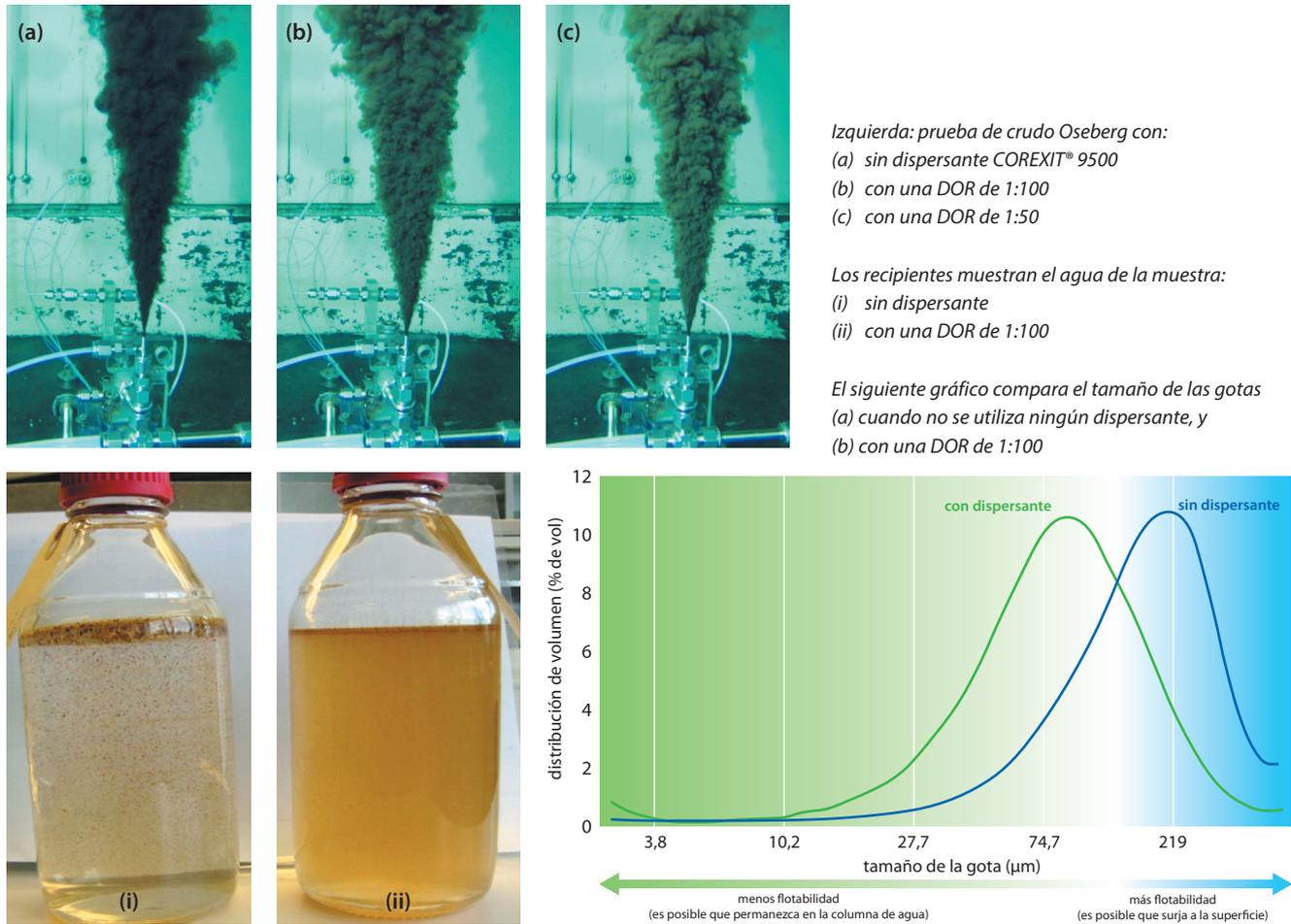
Como se menciona en la página 51, no es posible conocer la DOR bajo la superficie del mar que se utilizó en el incidente del Macondo debido a que las tasas de flujo del hidrocarburo y el gas no se conocieron con ningún grado de precisión.

La investigación posterior (Brandvik *et al.*, 2014b) usando descargas de hidrocarburo y gas a pequeña escala ha indicado que las DOR de 1:50 m 1:100 o menos pueden ser suficientes para causar una dispersión adicional de importancia. Durante un incidente, la DOR se basaría en las observaciones del monitoreo de campo. La tasa de bombeo de dispersante se ajustaría para lograr la DOR mínima necesaria para la dispersión eficaz a la tasa de flujo de hidrocarburo predominante. Ver Tabla 12.

Tabla 12 Tasas de bombeo de dispersante requeridas para lograr DO de 1:50 y 1:100 para una gama de tasas de flujo de hidrocarburo

Tasa de flujo de hidrocarburos	Tasa de bombeo de dispersante para lograr una DOR de 1:50		Tasa de bombeo de dispersante para lograr una DOR de 1:100	
	Galones de EE. UU./minuto	Litros/minuto	Galones de EE. UU./minuto	Litros/minuto
20.000	12	44	6	22
40.000	23	88	12	44
50.000	29	110	15	55
60.000	35	132	18	66
100.000	58	221	29	110

Figura 9 Prueba de crudo Oseberg con y sin dispersante agregado (fuente: SINTEF)



Fines del monitoreo y la toma de muestras bajo la superficie del mar

Monitoreo de una operación de dispersante bajo la superficie del mar

Aunque la SSDI es un método de respuesta eficaz, una parte del hidrocarburo puede ascender hasta la superficie donde se pueden utilizar los protocolos de técnicas más tradicionales para el monitoreo de derrames de hidrocarburos, como el uso de Monitoreo Especial de Tecnologías de Respuesta Aplicada (SMART, por sus siglas en inglés). Por lo tanto, los programas de monitoreo bajo la superficie del mar es posible que se implementen junto con los programas de monitoreo de hidrocarburo en superficie.

La API ha desarrollado directrices para el sector que se abocan principalmente al monitoreo operativo (API, 2013). Su enfoque es recopilar datos de monitoreo en tiempo real o cercanos al tiempo real que se pueden utilizar para comunicar las decisiones operativas para el día actual o el día siguiente. Los datos de monitoreo que requieren dos días para recopilarse y analizarse no apoyan la toma de decisiones operativas. La API agrupa las actividades de monitoreo en tres fases, las cuales abordan:

- la evaluación de la eficacia del uso de dispersante bajo la superficie del mar;
- la identificación de la naturaleza y la extensión de las columnas de hidrocarburos dispersados bajo la superficie del mar o cerca de la superficie, y
- una evaluación inicial de los posibles efectos ecológicos a medida que se relacionan con la toma de decisiones operativas de la respuesta.

Estas fases se inician en el orden que se muestra a continuación, pero cada fase se basa en la información producida por la fase que la precede. Cada fase está diseñada para implementarse en una línea cronológica que refleja la implementación de los recursos para la inyección de dispersante bajo la superficie del mar durante la fase de respuesta.

Fase 1: Evaluación de la eficacia de dispersantes bajo la superficie del mar

La pregunta inicial que el programa de monitoreo bajo la superficie del mar es “¿Es probable que la SSDI sea eficaz?”

Inicialmente, es necesario que el monitoreo en el punto de la descarga identifique la naturaleza de la descarga de hidrocarburos bajo la superficie del mar, estime las tasas de flujo del hidrocarburo y el gas y determine las propiedades y el comportamiento del hidrocarburo liberado. Esta información sirve como datos base previa a la aplicación del dispersante y se usa para orientar la selección de los métodos de inyección de dispersante y las tasas de aplicación.

Se puede estimar la eficacia del dispersante al comparar los datos de referencia recopilados antes de la aplicación del dispersante (es decir, la apariencia visual, los datos de la calidad del aire y el agua) con los datos recopilados después de iniciada la aplicación del dispersante. Es posible evaluar la eficacia del dispersante:

- Visualmente, al examinar el resultado de las cámaras de video en los ROV para evaluar su la forma o el color de la descarga de hidrocarburos cambia con la adición del dispersante.
- Acústicamente, al analizar los datos de retrodispersión generados desde un sonar montado en un ROV. La generación de imágenes de un sonar del chorro de hidrocarburos antes y después de la inyección de dispersantes también puede brindar una indicación de la eficacia del dispersante. Esto se debe a que el sonar, a la longitud de onda adecuada, debe emitir una fuerte señal de retrodispersión antes de la inyección de dispersante y una señal de retrodispersión mucho más débil después de la inyección.
- Visualmente, al analizar el área del hidrocarburo en la superficie en las fotografías aéreas. Se debe realizar la fotografía aérea antes y durante la inyección de dispersante bajo la superficie del mar para determinar si el uso de dispersante reduce la cantidad de hidrocarburo que llega a la superficie.
- Por monitoreo del aire en busca de VOC y porcentaje del límite explosivo inferior (LEL, por sus siglas en inglés) en embarcaciones en cercanía al sitio del pozo antes y después de la adición del dispersante.

Ninguna de estas técnicas individualmente puede cuantificar directamente la eficacia del dispersante, pero en grupo, los datos producidos pueden ofrecer suficiente evidencia para apoyar decisiones operativas para continuar o modificar el uso de dispersante. Note que los cambios en la expresión superficial del hidrocarburo tomarán tiempo para expresarse en función de los vientos/corrientes en la superficie y el tiempo previsto para el ascenso del hidrocarburo a través de la columna de agua.

Fase 2: Identificación de la naturaleza y la extensión de las columnas de hidrocarburos dispersados bajo la superficie del mar o cerca de la superficie

Una vez que se haya evaluado que la SSDI es eficaz, la siguiente fase del monitoreo busca definir la magnitud y el comportamiento de las columnas de hidrocarburo dispersado bajo la superficie del mar. Los fines de esta fase de monitoreo son:

- determinar la ubicación, la extensión y las características del hidrocarburo disuelto y dispersado dentro de la columna de agua;
- identificar el movimiento lateral y vertical del hidrocarburo disuelto y dispersado, y
- documentar los cambios en la concentración del hidrocarburo a medida que se aleja de la fuente.

Los datos oceanográficos locales junto con los modelos hidrodinámicos, de estar disponibles, determinarán la dirección probable del movimiento del hidrocarburo bajo la superficie del mar.

Monitoreo de la columna de agua

La estrategia principal de monitoreo implica el uso de una embarcación de investigación equipada con un bastidor en A y un cabrestante para realizar lanzamientos de muestreo usando un instrumento CTD y un muestreador de roseta. Se equipa el CTD con un fluorímetro, sensor de oxígeno disuelto y analizador de tamaño de partícula y retrodispersor de luz de láser para aguas profundas.

Usando esta estrategia, se recogen las muestras de agua y se almacenan para análisis químico a detalle posterior desde profundidades determinadas por los resultados de los lanzamientos del CTD para las estaciones seleccionadas. Las muestras de agua para la de terminación del oxígeno disuelto a bordo del barco se deben recolectar a profundidades por encima, en y por debajo de cualquier incremento observado en la respuesta fluorimétrica.

Un analizador de tamaño de partícula y retrodispersor de luz d láser ofrece mediciones in situ y en tiempo real de la distribución de tamaños de las gotas de hidrocarburos dispersados. Un cambio significativo en el tamaño de las gotas grandes a pequeñas es un indicador de dispersión del hidrocarburo.

Muestreo de agua

La determinación de los lugares para la toma de muestras de agua se debe basar en la información de un modelo confiable en 3-D de derrame de hidrocarburos bajo la superficie del mar. Si no se encuentra disponible dicho modelo, se debe desarrollar una cuadrícula de muestreo y centrarla en la ubicación del derrame. Se deben establecer estaciones en un patrón radial desplazándose desde el centro, y se deben utilizar las lecturas de fluorímetro de las mediciones de los lanzamientos del CTD y de la retrodispersión de la luz para determinar el trayecto del hidrocarburo dispersado.

Después de la recuperación de los instrumentos, se deben transferir las muestras del agua a recipientes adecuados y almacenarse hasta el análisis posterior.

Fase 3: Evaluación inicial del potencial de efectos ecológicos

Esta fase del monitoreo busca identificar totalmente todas las muestras de agua recolectadas por los lanzamientos del CTD, usando técnicas de análisis de laboratorio de última tecnología para analitos de petróleo y análisis de marcadores de dispersantes. Una vez que se han recolectado las muestras, se deben regresar a tierra para una rápida transferencia a un laboratorio certificado y acreditado utilizando los procedimientos de cadena de custodia adecuada. El tiempo de trayecto en la embarcación, el tiempo de transferencia de la muestra y el procesamiento en el laboratorio pueden representar un mínimo de cinco días para procesar una muestra, en función de la ubicación del incidente. En el caso de un derrame mayor donde se recolecten cantidades significativas de muestras, podría demorarse de 7 a 10 días para recibir los resultados analíticos detallados que hayan cumplido las normas de aseguramiento y control de la calidad (QA/QC, por sus siglas en inglés). Es improbable que muchas ubicaciones en el mundo tengan suficientes instalaciones de laboratorios para ofrecer el nivel de química toxicológica y analítica requeridos durante la fase de muestreo y monitoreo del agua de la respuesta de dispersante al incidente del Macondo.

Conclusión

El motivo para el uso de dispersantes, ya sea aplicados en hidrocarburos flotantes en la superficie o a una descarga bajo la superficie del mar, es el mismo: minimizar el daño ecológico y socioeconómico en general al evitar que los hidrocarburos liberados deriven hasta hábitats cercanos a la costa o costeros y a la costa. El uso de dispersante en hidrocarburos flotantes hace que se disperse en la capa superior de la columna de agua donde se diluye rápidamente y posteriormente se biodegrada. La inyección de dispersantes bajo la superficie del mar (SSDI) tiene como objetivo evitar que los hidrocarburos derramados bajo la superficie alcancen la superficie del mar al dispersarlos en el agua cerca del derrame. Esto proporciona un gran beneficio a la salud y la seguridad al reducir ampliamente la exposición a los compuestos orgánicos volátiles (VOC) del personal de respuesta que se encuentra cerca del sitio del derrame.

La experiencia obtenida respecto del uso de dispersante bajo la superficie del mar en el incidente del Macondo de 2010 ha mostrado que la SSDI puede ser un método de respuesta eficaz para reventones de hidrocarburos y gas bajo la superficie del mar. Si no se hubiera implementado el uso de dispersantes bajo la superficie del mar, más hidrocarburos habrían logrado llegar a las costas. Hubo grandes problemas para la implementación de una respuesta a un derrame de hidrocarburos a 5100 pies (1550 m) bajo la superficie del mar usando un método nunca antes utilizado. Fueron necesarios ingenio y conocimientos amplios para desarrollar la inyección de dispersante bajo la superficie del mar (SSDI) a una respuesta viable durante la mayor respuesta a un derrame de hidrocarburos jamás emprendida.

La SSDI como respuesta a un derrame bajo la superficie del mar tiene muchas ventajas si se compara con la estrategia de responder ante el hidrocarburo derramado después de que este haya alcanzado la superficie del mar. El uso de SSDI:

- trata el hidrocarburo derramado en el punto de descarga;
- utiliza menos dispersante si se compara con el tratamiento de hidrocarburos en superficie;
- reduce la exposición potencial del personal de respuesta a los VOC y el hidrocarburo;
- se puede realizar de manera continua, día y noche y en prácticamente cualquier condición meteorológica, al contrario de los métodos de respuesta que se utilizan en la superficie del mar.

El uso de SSDI para dispersar hidrocarburos liberados en la columna de agua tiene capacidades y límites además de posibles beneficios y riesgos. Al considerar el uso de SSDI o cualquier otro método de respuesta, se deben abordar los beneficios y los riesgos asociados al realizar un análisis de beneficio ambiental neto (ABAN). La adición de dispersante provocará que una cantidad mayor de hidrocarburos se transforme en pequeñas gotas que se dispersarán dentro de la columna de agua y posteriormente se biodegradarán en gran medida. El uso de SSDI tiene los siguientes beneficios.

- La dispersión eficaz en la columna de agua del hidrocarburo derramado evita que el hidrocarburo alcance la superficie del mar, donde podría quedar a la deriva y en potencia provocar daños graves a los hábitats costeros sensibles a los hidrocarburos y alterar las actividades socioeconómicas.
- La dispersión del hidrocarburo en el agua en la forma de pequeñas gotas permite la colonización rápida de los microorganismos degradadores del petróleo que ocurre de manera natural en los medios ambientes de los océanos. Estos microorganismos degradarán de manera significativa la mayoría de los hidrocarburos en un plazo de días o semanas. El dispersante también será biodegradado.

Sin embargo, aumentar la cantidad y las concentraciones del hidrocarburo dispersado en el agua aumenta el riesgo de daño potencial a los organismos marinos por la exposición al hidrocarburo dispersado, especialmente en la cercanía a la fuente.

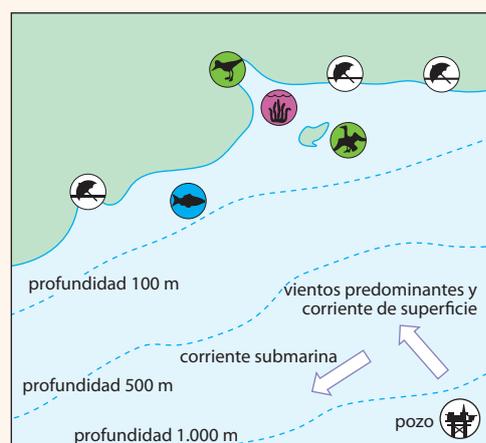
Todas las partes involucradas deben comprender las ventajas y desventajas que implica el uso de SSDI y, de forma ideal, se debe abordar durante la planificación para contingencias ante derrames de hidrocarburos.

La logística para realizar la SSDI requiere de equipo especial, así como de personal capacitado y apoyo considerables. Serán necesarios varios ROV con embarcaciones dedicadas de suministros costa afuera. El uso de dispersantes bajo la superficie del mar requiere de monitoreo submarino para evaluar su eficacia, así como el lugar a donde las corrientes predominantes en aguas profundas trasladarán a las columnas de hidrocarburo. Para enfrentar las inquietudes acerca de la posibilidad de efectos tóxicos de los hidrocarburos dispersados sobre los organismos marinos, puede ser adecuado realizar un monitoreo extenso y estudios de muestreo de agua con análisis químicos y pruebas de toxicidad posteriores. Esto se llevó a cabo en el incidente del Macondo. Aunque la investigación aún está en marcha al momento de la preparación de esta guía, los datos disponibles indican que las preocupaciones acerca de la toxicidad sustancial para los organismos marinos, el agotamiento del oxígeno en el agua debido a la biodegradación y la persistencia de dispersantes en la columna de agua son infundadas y que el uso de dispersantes bajo la superficie del mar ha demostrado ser una herramienta muy eficaz para respuestas a derrames.

Anexo: Esquema de ABAN para cuatro escenarios de planificación de descargas bajo el nivel del mar

Escenario 1

Un pozo de exploración sufre pérdida de control incluyendo la falla del preventor de reventones. Se liberan hidrocarburo crudo y gas, estimándose el flujo del hidrocarburo en 3000 m³ (19.000 barriles) diarios.



- El pozo está en a una profundidad de agua de 1100 m.
- Las manchas de hidrocarburo que surgen a la superficie se encuentran a la deriva hacia la costa bajo la influencia de un viento predominante de 15 nudos y corriente de superficie.
- Una corriente submarina corre paralela a la costa
- La altura de las olas es de alrededor de 1,5 m.
- Hay zonas de pesca cerca de la costa y lechos de algas en aguas poco profundas.
- Los recursos costeros que podrían ser impactados por el hidrocarburo incluyen un bajo fangoso estuarino que alberga una gran población de aves zancudas. Una isla costa afuera alberga una colonia de aves marinas. Hay tres populares complejos turísticos cercanos.

Resumen del ABAN

Evaluar los datos

Sin ninguna intervención y bajo las condiciones predominantes, el modelado predice una probabilidad del 80 % de que el hidrocarburo derramado que surge a la superficie podría alcanzar la costa, siendo un plazo de cuatro días para que el hidrocarburo alcance la costa. Durante este tiempo, el hidrocarburo derramado envejecería y se emulsionaría progresivamente. El volumen del hidrocarburo derramado disminuiría inicialmente debido a la pérdida por evaporación, pero después aumentaría debido a la emulsificación. Esto podría producir hasta 10.000 m³ al día de hidrocarburo emulsificado que amenazaría la costa después de cuatro días. El gas liberado dentro de los fluidos del pozo se disolvería antes de alcanzar la superficie.

Predecir los resultados

Las sensibilidades alrededor de la costa y en la costa son muy altas y su protección contra el hidrocarburo daría como resultado un gran beneficio medioambiental. El bajo fangoso estuarino es biológicamente productivo y difícil tanto de proteger con barreras como de limpiar en caso de impregnarse de hidrocarburos. La colonia de aves marinas no incluye especies amenazadas, pero aumenta la atracción de turistas a la zona, con excursiones en botes a diario. Los complejos turísticos son una parte importante de la economía regional, que dependen de las populares playas de arena y deportes acuáticos. El turismo es estacional, pero esta situación sucede en la principal temporada. La amenaza a las playas podría provocar una interrupción inmediata e importante y tiene el potencial de dañar la confianza en la zona y de reducir las reservaciones en el futuro. La pesquería en la costa tiene importancia local, pero es económicamente pequeña en relación con el turismo.

continúa...

Sopesar ventajas y desventajas

La contención y recuperación en el mar o la quema controlada in situ por sí mismas no podrían enfrentar la cantidad de hidrocarburo derramado dado el tiempo de que se dispone. Es posible el uso de dispersante en superficie; el crudo se ha probado que es susceptible al uso de dispersante antes de la emulsificación, con un plazo de oportunidad de alrededor de 24 horas. Las condiciones predominantes con olas de 1,5 m de altura y vientos de 15 nudos son adecuadas para el uso de dispersante. Sin embargo, el hidrocarburo que surge a la superficie se extendería y se fragmentaría rápidamente, lo que representaría problemas para identificar y encontrar el hidrocarburo flotante incluso usando una combinación de embarcaciones y sistemas aéreos. Se necesitaría aplicar aproximadamente 150 m³ de dispersante al día, basado en una relación dispersante:hidrocarburo (DOR) de 1:20. Se dispone de un sistema de aplicación aérea antes de 24 horas, con capacidad de aplicar hasta 100 m³ de dispersante al día. La primera respuesta está disponible desde una embarcación de espera con un sistema de rociado para botes y existencia de 5 m³ de dispersante.

La movilización de un sistema de inyección de dispersante bajo la superficie del mar como parte de un sistema de sellado permitiría que el tratamiento iniciara en un plazo de siete días, con dispersante suministrado de la reserva mundial. La inyección en el cabezal del pozo incrementaría ampliamente tanto la determinación de objetivos de la operación de dispersante como el volumen del hidrocarburo que emerge a la superficie. El DOR podría disminuir a 1:50 o menos, reduciendo el volumen de dispersante utilizado al día en más el 50%. La aplicación de dispersante en superficie podría entonces reducirse o detenerse.

Mejorar la dispersión del hidrocarburo bajo la superficie del mar al usar inyección de dispersante plantearía un mayor riesgo a la vida marina de la zona pelágica, especialmente en un radio de unos pocos kilómetros de la ubicación del pozo. Sin embargo, la dilución del hidrocarburo dispersado (i) reduciría las concentraciones a niveles inferiores a la toxicidad en la zona más amplia, (ii) mejoraría la biodegradación y (iii) mitigaría ampliamente la impregnación de hidrocarburos de la zona costera sensible.

Se prevé que el pozo podría ser sellado en un plazo de 15 días.

Seleccionar las mejores opciones

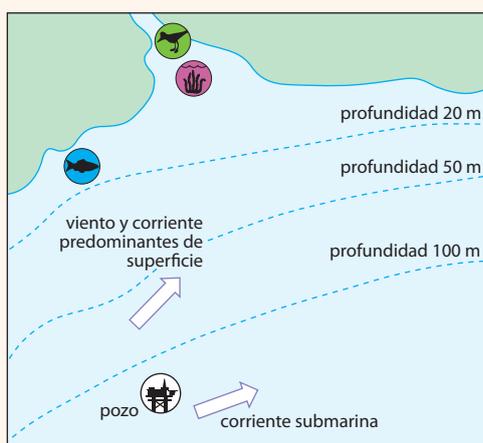
El uso inicial del dispersante en superficie sobre el hidrocarburo derramado flotante, seguido por una inyección bajo el nivel del mar tan pronto como sea posible la movilización sería eficaz y sería la herramienta principal de respuesta.

Se movilizarían las operaciones de contención y recuperación en la costa y se dirigirían alrededor de las zonas sensibles desde el punto de vista ecológico.

Se realizaría la limpieza de la costa alrededor de las playas turísticas de arena.

Escenario 2

Un pozo de exploración sufre pérdida de control incluyendo la falla del preventor de reventones. Se derraman crudo y gas, estimándose el flujo del hidrocarburo en alrededor de 3000 m³ (19.000 barriles) por día.



- El pozo está en a una profundidad de agua de 130 m.
- Las manchas de hidrocarburo que surgen a la superficie se encuentran a la deriva hacia la costa bajo la influencia de un viento predominante de 10 nudos y corriente de superficie.
- Una corriente submarina corre paralela a la costa.
- La altura de las olas es de alrededor de 0,5 m.
- Hay zonas de pesca cerca de la costa y lechos de algas en aguas poco profundas.
- Entre los recursos costeros que podrían afectarse por el hidrocarburo se encuentran una marisma estuarina que alberga una gran población de aves acuáticas.

Resumen del ABAN

Evaluar los datos

Sin ninguna intervención y bajo las condiciones predominantes, el modelado predice una probabilidad del 95% de que el hidrocarburo derramado que surge a la superficie podría alcanzar la costa, siendo un plazo de aproximadamente dos días para que el hidrocarburo alcance la costa. Durante este tiempo, el hidrocarburo derramado envejecería y se emulsionaría progresivamente. El volumen del hidrocarburo derramado disminuiría inicialmente debido a la pérdida por evaporación, pero después aumentaría debido a la emulsificación. Esto podría producir hasta 10.000 m³ al día de hidrocarburo emulsificado que amenazaría la costa después de dos días.

Predecir los resultados

Las sensibilidades cerca de la costa y en la costa son altas y su protección contra el hidrocarburo podría producir un gran beneficio medioambiental. El bajo fangoso estuarino es biológicamente productivo y difícil tanto de proteger con barreras como de limpiar en caso de impregnarse de hidrocarburos. La pesquería costera es importante a nivel local.

Sopesar ventajas y desventajas

El gas incluido en los fluidos del pozo no tendría tiempo para disolverse totalmente y surgiría a la superficie en el sitio del pozo. Esto restringiría seriamente las operaciones en la cercanía del sitio debido a preocupaciones de seguridad. La respuesta a la contaminación en superficie sería limitada a las zonas del mar alejadas del sitio.

La contención y recuperación en el mar o la quema controlada in situ por sí mismas no podrían enfrentar la cantidad de hidrocarburo derramado dado el tiempo de que se dispone. Es posible el uso de dispersante en superficie; el crudo se ha probado que es susceptible al uso de dispersante antes

continúa...

de la emulsificación, con un plazo de oportunidad de alrededor de 24 horas. Las condiciones predominantes con olas de altura de 0,5 metros y vientos de 10 nudos son adecuadas para el uso de dispersante. Sin embargo, el hidrocarburo que surge a la superficie se extendería y fragmentaría rápidamente, especialmente bajo la influencia del gas dentro de los fluidos del pozo, planteando desafíos para la determinación de objetivos y la tasa de encuentro del hidrocarburo flotante incluso usando una combinación de embarcaciones y sistemas aéreos. Para tratar todo el hidrocarburo, se necesitaría aplicar aproximadamente 150 m³ de dispersante al día, basado en una relación dispersante:hidrocarburo (DOR) de 1:20. Se dispone de un sistema de aplicación aérea antes de 24 horas, con capacidad de aplicar hasta 100 m³ de dispersante al día. La primera respuesta está disponible desde una embarcación de espera con un sistema de rociado para botes y existencia de 5 m³ de dispersante. Se permitiría el rociado hasta el contorno de 20 m de profundidad, de acuerdo con las normativas nacionales.

La movilización de un sistema de inyección de dispersante bajo la superficie del mar puede demorarse o restringirse por el gas presente en la superficie. Se realizarían evaluaciones específicas para investigar la viabilidad de implementar un sistema de inyección bajo la superficie del mar. Se considerarse viable, la inyección en el cabezal del pozo incrementaría ampliamente la determinación de objetivos de la operación de dispersante y reduciría en una gran cantidad el volumen del hidrocarburo que emerge a la superficie. Se podría reducir la DOR a 1:50 o menos, lo que también podría ocasionar una reducción en el volumen del dispersante utilizado por día en más de 50%. En estas circunstancias, el ascenso del gas puede trasladar hidrocarburos dispersados hacia la parte superior de la columna de agua, en vez de crear una columna bajo la superficie del mar. La aplicación de dispersante en superficie se podría reducir en gran medida o detenerse.

La mejora de la dispersión del hidrocarburo bajo la superficie mediante la inyección de dispersante plantearía un mayor riesgo a la vida marina de la zona pelágica, especialmente en un radio de unos pocos kilómetros de la ubicación del pozo. La dilución del hidrocarburo dispersado (i) reduciría las concentraciones a niveles inferiores a la toxicidad en la zona más amplia, (ii) mejoraría la biodegradación y (iii) mitigaría ampliamente la impregnación de hidrocarburos de la zona costera sensible.

En función de las circunstancias, el pozo se podría sellar en un plazo de 15 días o detenerse el flujo cuando sea posible perforar un pozo de alivio.

Seleccionar las mejores opciones

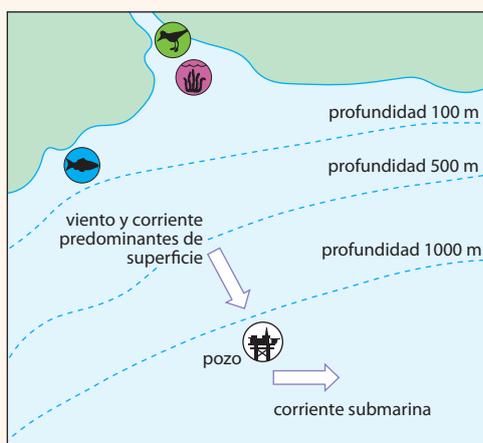
El uso inicial de dispersante en la superficie sobre hidrocarburos derramados flotantes seguido por la inyección bajo la superficie del mar en caso de ser posible movilizar e implementar con seguridad, sería una parte eficaz de la respuesta.

Se movilizarían las operaciones de contención y recuperación en la costa y se dirigirían alrededor de las entradas sensibles desde el punto de vista ecológico. Debido a que la zona se encuentra alejada de poblaciones y zonas habitadas importantes, se movilizaría la quema controlada in situ.

Se considerarían las opciones de limpieza de la costa, dado la extensión y el tipo de los hábitats costeros afectados.

Escenario 3

Un pozo de exploración sufre pérdida de control incluyendo la falla del preventor de reventones. Se derraman crudo y gas, estimándose el flujo del hidrocarburo en alrededor de 2000 m³ (12.500 barriles) por día.



- El pozo está en a una profundidad de agua de 1200 m.
- Las manchas de hidrocarburo que emergen a la superficie se dirigen a la deriva alejándose e la costa bajo la influencia de una corriente de viento y superficie de 20 a 25 nudos.
- Una corriente submarina corre paralela a la costa.
- La altura de las olas es de alrededor de 2,5 m.
- Hay zonas de pesca cerca de la costa y lechos de algas en las aguas someras, aunque estas no se encuentran amenazadas actualmente.
- Sin embargo, los recursos costeros que podían ser impactados por el hidrocarburo si el viento cambia de dirección incluyen un bajo fangoso estuarino que alberga una gran población de aves zancudas. Una isla costa afuera alberga una colonia de aves marinas. Hay tres populares complejos turísticos cercanos.

Resumen del ABAN

Evaluar los datos

Sin ninguna intervención y bajo las condiciones predominantes, el modelado predice una probabilidad del 0% de que el hidrocarburo derramado que surge a la superficie podría alcanzar la costa. El modelado predice que una gran proporción de la descarga bajo la superficie del mar se dispersará naturalmente. Además, el hidrocarburo que surge a la superficie se disgregará y disipará bajo las condiciones predominantes de mar agitado, produciendo únicamente manchas de hidrocarburos transitorias en la superficie. El gas liberado dentro de los fluidos del pozo se disolvería antes de alcanzar la superficie.

Predecir los resultados

Las sensibilidades alrededor de la costa y en la costa son muy altas y su protección contra el hidrocarburo daría como resultado un gran beneficio medioambiental. Sin embargo, las condiciones meteorológicas predominantes incidan que los recursos costeros no se encuentran bajo amenaza inmediata de contaminación por hidrocarburos.

Sopesar ventajas y desventajas

Las condiciones predominantes de mar agitado imposibilitarían la contención y recuperación en el mar o la quema controlada in situ, dejando la inyección de dispersante bajo la superficie del mar y la aplicación de dispersante en superficie como las únicas opciones de respuesta activa viables para tratar cualquier hidrocarburo flotante.

continúa...

Las condiciones actuales son de vientos predominantes continuos costa afuera de entre 20 y 25 nudos para los siguientes 3 a 5 días. El modelado indica que esto continuará disolviendo cualquier hidrocarburo que surja a la superficie sin la formación de manchas persistentes.

Seleccionar las mejores opciones

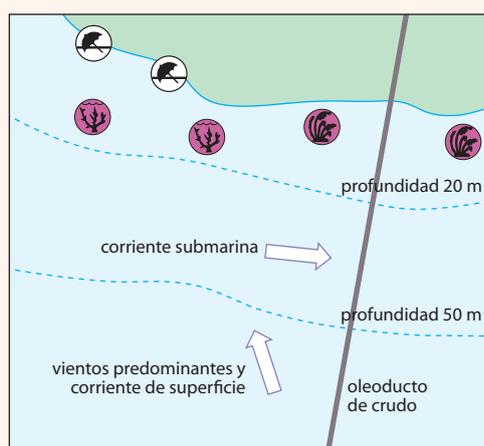
Son necesarios la vigilancia y el monitoreo aéreo de la zona costa afuera alrededor de la descarga para evaluar y verificar las predicciones del modelado, incluida la disipación rápida de cualquier mancha de hidrocarburos que surja a la superficie.

Como medida de precaución, se emprendería la movilización a una condición de espera de la capacidad de aplicación de inyección de dispersante bajo la superficie del mar y en superficie. La opción del dispersante solo se utilizaría si el clima amainara hasta el grado en que se empezaran a formar manchas superficiales persistentes observables. La preferencia inicial sería entonces inyectar dispersante bajo la superficie del mar, proporcionar los medios más eficaces o evitar que el hidrocarburo alcance la superficie.

El monitoreo del pronóstico meteorológico de 5 a 10 días informaría cualquier otra decisión de movilizar otras herramientas de respuesta, incluidos los sistemas de contención y recuperación en el mar y la capacidad de protección de la costa. Sin embargo, la localidad tiene vientos persistentes costa afuera durante la temporada en la cual este incidente ha ocurrido, y, lo tanto, es improbable que se necesiten estos recursos a mediano plazo.

Escenario 4

Un oleoducto que transporta crudo sufre daños debidos al arrastre del ancla de una embarcación. Se cierra la línea, pero se detecta hidrocarburo en la superficie del mar.



- El incidente ocurre a una profundidad del agua de 50 m.
- Las manchas de hidrocarburo que surgen a la superficie se encuentran a la deriva hacia la costa bajo la influencia de un viento predominante de 10 nudos y corriente de superficie.
- Una corriente submarina corre paralela a la costa.
- La altura de las olas es de alrededor de 0,5 m.
- Hay manglares a lo largo de la costa y complejos turísticos con arrecifes de coral costa afuera hacia el oeste.

Resumen del ABAN

Evaluar los datos

Sin ninguna intervención y bajo las condiciones predominantes, el modelado predice una probabilidad del 98% de que el hidrocarburo derramado que surge a la superficie podría alcanzar la costa, siendo un plazo de aproximadamente 24 horas para que el hidrocarburo alcance la costa. Durante este tiempo, el hidrocarburo derramado envejecería y se emulsionaría progresivamente. El volumen del hidrocarburo derramado disminuiría inicialmente debido a la pérdida por evaporación, pero a continuación se incrementaría debido a la emulsificación. El volumen máximo en la tubería es de aproximadamente 2000 m³.

Predecir los resultados

Las sensibilidades costeras más importantes desde el punto de vista ecológico son altas y su protección contra el hidrocarburo podría producir un gran beneficio medioambiental. Los manglares son biológicamente productivos y difícil tanto de proteger con barreras como de limpiar en caso de impregnarse de hidrocarburos. Los complejos turísticos son de estilo lujoso y dependen en gran medida de las playas prístinas y de la clientela de buceo.

Sopesar ventajas y desventajas

En función de la magnitud del daño a la tubería, se esperaría una descarga inicial de hidrocarburo seguida de fugas de menor volumen.

Se daría preferencia a la contención y recuperación en la costa y se movilizarían los sistemas. Es posible el uso de dispersante en superficie; el crudo se ha probado que es susceptible al uso de dispersante antes de la emulsificación. Las condiciones predominantes con olas de 0,5 m de altura y vientos de 10 nudos

continúa...

son adecuadas tanto para la recuperación como para el uso de dispersante. Se dispone de un sistema de aplicación aérea antes de 6 horas, con capacidad de aplicar hasta 15 m³ de dispersante al día. El rociado se permite hasta un contorno de 20 m de profundidad y a más de 2 km de distancia de los arrecifes de coral de acuerdo con las normativas nacionales.

No sería viable la movilización de un sistema de inyección de dispersante bajo la superficie del mar ya que no hay la energía de mezclado adecuada bajo la superficie del mar de una descarga de tubería de este tipo.

Seleccionar las mejores opciones

El uso inicial de dispersante bajo la superficie del mar sobre hidrocarburos derramados flotantes ofrecería la respuesta más rápida y proporcionaría la mejor opción para la protección del hábitat del manglar de importancia crítica. Esto sería apoyado por el uso de operaciones de contención y recuperación dentro del contorno de 20 m. Se realizarían las preparaciones para la limpieza de las playas de los complejos turísticos donde resulte adecuado.

Referencias

Adams, E. E., and Socolofsky, S. A. (2005). *Review of Deep Oil Spill Modeling Activity Supported by the DeepSpill JIP and Offshore Operators Committee*. December 2004, revised 2005.

www.researchgate.net/publication/265031649_DEEP_OIL_SPILL_MODELING_ACTIVITY_SUPPORTED_BY_THE_DEEPSpill_JIP_AND_OFFSHORE_OPERATORS_COMMITTEE

Al-Sabagh, A. M., El-Hamouly, S. H., Atta, A. M., El-Din, M. R. N. and Gabr, M. M. (2007). Synthesis of some oil spill dispersants based on sorbitol esters and their capability to disperse crude oil on seawater to alleviate its accumulation and environmental impact. In *Journal of Dispersion Science and Technology*, Vol. 28, Issue 5, pp. 661-670.

American Academy of Microbiology. (2011). *Microbes & Oil Spills FAQs*. A report from the American Academy of Microbiology, 1752 N Street, NW Washington, DC 20036. www.asm.org.

Anderson, J., Neff, J., Cox, B., Tatem, H. and Hightower G. M. (1974). Characteristics of dispersions and water-soluble extracts of crude and refined oils and their toxicity to estuarine crustaceans and fish. In *Marine Biology*, Vol. 27, Issue 1, pp. 75-88.

API (2013). *Industry Recommended Subsea Dispersant Monitoring Plan. Version 1.0*. American Petroleum Institute (API) Technical Report 1152, September 2013. 20pp.

Atlas, R. M. and Bartha, R. (1992). Hydrocarbon Biodegradation and Oil Spill Bioremediation. In *Advances in Microbial Ecology*, Vol. 12, pp. 287-338.

Atlas, R. M. and Cerniglia, C. E. (1995). Bioremediation of Petroleum Pollutants: Diversity and environmental aspects of hydrocarbon biodegradation. In *BioScience*, Vol. 45, Issue 5, pp. 332-338.

Brandvik, P. J. and Daling, P.S. (1998). Optimisation of oil spill dispersant composition by mixture design and response surface methods. In *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, Vol. 42, pages 63-72. ISSN:0169-7439. DOI:10.1016/S0169-7439(98)00009-4

Brandvik, P. J., Johansen, Ø., Leirvik, F., Farooq, U. and Daling, P. S. (2013). Droplet breakup in subsurface oil releases – Part 1: Experimental study of droplet breakup and effectiveness of dispersant injection. In *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 73, Issue 1, pp. 319-326. doi:10.1016/j.marpolbul.2013.05.020

Brandvik, P. J., Johansen, Ø. and Farooq, U. (2014a). Subsea Release of Oil & Gas – A Downscaled Laboratory Study Focused on Initial Droplet Formation and the Effect of Dispersant Injection. *International Oil Spill Conference Proceedings*: May 2014, Vol. 2014, No. 1, pp. 283-298.

Brandvik, P. J., Johansen, Ø., Farooq, O., Angell, G. and Leirvik, F. (2014b). *Subsurface oil releases - Experimental study of droplet distributions and different dispersant injection techniques Version 2*. A scaled experimental approach using the SINTEF Tower basin. SINTEF report no. A26122. Trondheim, Norway.

Brochu, C., Pelletier, É., Caron, G. and Desnoyers, J. E. (1986). Dispersion of crude oil in seawater: the role of synthetic surfactants. In *Oil and Chemical Pollution*, Vol. 3, No. 4, 257-279.

Campo, P., Venosa, A. D. and Suidan, M. T. (2013). Biodegradability of COREXIT 9500 and Dispersed South Louisiana Crude Oil at 5 and 25 °C. In *Environmental Science & Technology*, Vol. 47, No. 4, pp. 1960-1967.

Chevron, 2012. *Frade Response: Updates and Information on Our Work to Resolve the Frade Field Incident in Brazil's Campos Basin*. www.chevron.com/fraderesponse

Di Toro, D. M., McGrath, J. A. and Stubblefield, W. A. (2007). Predicting the toxicity of neat and weathered crude oil: Toxic potential and the toxicity of saturated mixtures. In *Environmental Toxicology and Chemistry*, Vol. 26, Issue 1, pp. 24-36.

Farrington, J. (1980). *NOAA Ship RESEARCHER/Contract Vessel PIERCE Cruise to IXTOC-I Oil Spill: Overview and Integrative Data Assessment and Interpretation*. A summary and assessment report of data collected during research cruises in the Gulf of Mexico during the Ixtoc I oil spill. Woods Hole Oceanographic Institution. www.whoi.edu/oil/ixtoc-i

Fiocco, R. J., Lessard, R. R., Canevari, G. P., Becker K. W. and Daling, P. S. (1995). The Impact of Oil Dispersant Solvent on Performance. In *The use of Chemicals in Oil Spill Response*. ASTM STP 1252, P. Lane, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.

GESAMP (2014). Revised GESAMP Hazard Evaluation Procedure for Chemical Substances Carried by Ships, 2nd Edition (IMO/FAO/UNESCO-IOC/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNIDO/UNDP) Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection, Rep. Stud. GESAMP No. 64. www.gesamp.org/publications/publicationdisplaypages/rs64

Hazen, T. C., Dubinsky, E. A., DeSantis, T. Z., Andersen, G. L., Piceno, Y. M., Singh, N., Jansson, J. K., Probst, A., Borglin, S. E., Fortney, J. L., Stringfellow, W. T., Bill, M., Conrad, M. E., Tom, L. M., Chavarria, K. L., Alusi, T. R., Lamendella, R., Joyner, D. C., Spier, C., Baelum, J., Auer, M., Zemla, M. L., Chakraborty, R., Sonnenthal, E. L., D'haeseleer, P., Holman, H-Y. N., Osman, S., Lu, Z., Van Nostrand, J. D., Deng, Y., Zhou, J. and Mason, O. U. (2010). Deep-Sea Oil Plume Enriches Indigenous Oil-Degrading Bacteria. In *Science*, Vol. 330, No. 6001, pp. 204-208. DOI:10.1126/science.1195979.

Heitkamp, M. A. and Cerniglia, C. E. (1987). Effects of chemical-structure and exposure on the microbialdegradation of polycyclic aromatic-hydrocarbons in freshwater and estuarine ecosystems. In *Environmental Toxicology and Chemistry*, Vol. 6, Issue 7, pp. 535-546.

Hemmer, M J., Barron, M. G. and Greene, R. M. (2010). *Comparative Toxicity of Eight Oil Dispersant Products on Two Gulf of Mexico Aquatic Test Species*. U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development. U.S.EPA/ORD Contributors: National Health and Environmental Effects Research Laboratory.

IPIECA/IMO/IOGP (2012). *Sensitivity mapping for oil spill response*. IPIECA-IOGP Good Practice Guide Series, Oil Spill Response Joint Industry Project (OSR-JIP). IOGP Report 477. <http://oilspillresponseproject.org>

IPIECA-IOGP (2014). *Regulatory approval of dispersant products and authorization for their use*. Report of the IOGP Global Industry Response Group (GIRG) response to the Macondo incident in the Gulf of Mexico in April 2010, Oil Spill Response Joint Industry Project (OSR-JIP). <http://oilspillresponseproject.org>

IPIECA-IOGP (2015). *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 (2015a). *Impacts of oil spills on marine ecology*. IPIECA-IOGP Good Practice Guide Series, Oil Spill Response Joint Industry Project (OSR-JIP). IOGP Report 525. <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). *Contingency planning for oil spills on water*. IPIECA-IOGP Good Practice Guide Series, Oil Spill Response Joint Industry Project (OSR-JIP). IOGP Report 519. <http://oilspillresponseproject.org>
- IPIECA-IOGP (2016). *Impacts of oil spills on shorelines*. IPIECA-IOGP Good Practice Guide Series, Oil Spill Response Joint Industry Project (OSR-JIP). IOGP Report 534. <http://oilspillresponseproject.org/completed-products>
- JAG (2010a). *Review of Preliminary Data to Examine Subsurface Oil In the Vicinity of MC252#1, May 19 to June 19, 2010*. Joint Analysis Group (JAG) for Surface and Sub-Surface Oceanography, Oil and Dispersant Data. http://service.ncddc.noaa.gov/rdn/www/activities/healthy-oceans/jag/reports/documents/JAG_Data_Report_2_FINAL.pdf
- JAG (2010b). *Review of R/V Brooks McCall Data to Examine Subsurface Oil*. Joint Analysis Group (JAG) for Surface and Sub-Surface Oceanography, Oil and Dispersant Data. http://www.noaa.gov/scienceemissions/PDFs/JAG_Report_1_BrooksMcCall_Final_June20.pdf
- JAG (2012). *Review of Subsurface Dispersed Oil and Oxygen Levels Associated with the Deepwater Horizon MC252 Spill of National Significance*. NOAA Technical Report NOS OR&R 27, pp. 95. Joint Analysis Group (JAG) for Surface and Sub-Surface Oceanography, Oil and Dispersant Data.
- Johansen, Ø., Brandvik, P. J. and Farooq, U. (2013). Droplet breakup in subsea oil releases – Part 2: Predictions of droplet size distributions with and without injection of chemical dispersants. In *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 73, Issue 1, pp. 327–335. doi:10.1016/j.marpolbul.2013.04.012
- Johansen, Ø., Rye, H. and Cooper, C. (2003). DeepSpill—Field Study of a Simulated Oil and Gas Blowout in Deep Water. In *Spill Science & Technology Bulletin*, Vol. 8, Issues 5–6, pp. 433–443. doi:10.1016/S1353-2561(02)00123-8.
- Johansen, Ø., Rye, H., Melbye, A. G., Jensen, H. V., Serigstad, B. and Knutsen, T. (2001). *Deepspill JIP experimental discharges of gas and oil at Helland Hansen*. SINTEF Technical Report, June 2000.
- King, G. M., Kostka, J. E., Hazen, T. and Sobczyk, P. (2014). 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. DOI:10.1146/annurev-marine-010814-015543. www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev-marine-010814-015543
- Kvenvolden, K. A. (2003). Natural seepage of crude oil into the marine environment. In *Geo-Marine Letters*, Vol. 23, Issues 3–4, pp.140–146.
- Lindstrom, J. E. and Braddock, J. F. (2002). Biodegradation of petroleum hydrocarbons at low temperature in the presence of the dispersant COREXIT 9500. In *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 44, Issue 8, pp.739–747.
- MacNaughton, S. J., Swannell, R. P. J., Daniel, F. and Bristow, L. (2003). Biodegradation of dispersed Forties crude and Alaskan North Slope oils in microcosms under simulated marine conditions. In *Spill Science and Technology Bulletin*, Vol. 8, Issue 2, pp. 179–186.

- Neff, J. M. and Burns, W. A. (1996). Estimation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Concentrations in the Water Column Based on Tissue Residues in Mussels and Salmon: An Equilibrium Partitioning Approach. In *Journal of Environmental Toxicology and Chemistry*, Vol. 15, Issue 12, pp. 2240–2253.
- NOAA (2010). *Analysis of Hydrocarbons in Samples Provided from the Cruise of the R/V WEATHERBIRD II, May 23–26, 2010*. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Silver Spring, Maryland, USA. www.noaa.gov/stories/2010/.../noaa_weatherbird_analysis.pdf
- NRT (2013). *Environmental Monitoring for Atypical Dispersant Operations: Including Guidance for: Subsea Application; Prolonged surface Application*. U.S. National Response Team (NRT). www.nrt.org/production/NRT/NRTWeb.nsf/PagesByLevelCat/Level3Oil?Opendocument
- OSAT (2010). *Summary Report for Sub-Sea and Sub-Surface Oil and Dispersant Detection: Sampling and Monitoring*. Report prepared by the Operational Science Advisory Team (OSAT), Unified Area Command, for the US Coast Guard, 17 December 2010. www.restorethegulf.gov/sites/default/files/documents/pdf/OSAT_Report_FINAL_17DEC.pdf
- OSAT (2011) *Summary Report for Sub-Sea and Sub-Surface Oil and Dispersant Detection: Ecotoxicity Addendum*. Report prepared by the Operational Science Advisory Team (OSAT), Gulf Coast Incident Management Team, for the US Coast Guard, 8 July 2011. www.restorethegulf.gov/sites/default/files/u306/FINAL%20OSAT%20Ecotox%20Addendum.pdf
- Prince, R. C. (1997). Bioremediation of marine oil spills. In *Trends in Biotechnology*, Vol. 15, Issue 5, pp. 158–160.
- Prince, R. C., McFarlin, K. M., Butler, J. D., Febbo, E. J., Wang, F. C. Y. and Nedwed, T. J. (2013). The primary biodegradation of dispersed crude oil in the sea. In *Chemosphere*, Vol. 90, Issue 2, pp. 521–526.
- Singer, M. E. and Finnerty, W. R. (1984). Microbial metabolism of straight-chain and branched alkanes. In Atlas, R. M. (Ed.) *Petroleum Microbiology*, pp. 1–59. Macmillan Publishing Company, New York.
- Smith, J. E. (1968). *Torrey Canyon Pollution and Marine Life*. Cambridge University Press, New York.
- Socolofsky, S. A. (2012). *Integral plume modeling of subsea accidental oil-well blowouts*. Presentation to the Nearfield Modeling ListServe, 11 June 2012. https://ceprofs.civil.tamu.edu/ssocolofsky/nfm/Downloads/socolofsky_Jun_11.pdf
- US EPA (2010). *Comparative Toxicity of Louisiana Sweet Crude Oil (LSC) and Chemically Dispersed LSC to Two Gulf of Mexico Aquatic Test Species*. August 2010 and the updated report of September 2010. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development. Available at: www.epa.gov/bpspill/dispersants-testing.html
- US EPA (2010a). *Dispersant Monitoring and Assessment Directive—Addendum 3*. US Environmental Protection Agency Archive Document, 26 May 2010. www.epa.gov/bpspill/dispersants/directive-addendum3.pdf
- US EPA (2010b). *Dispersant Monitoring and Assessment Directive for Subsurface Dispersant Application*. US Environmental Protection Agency Archive Document, 10 May 2010. www.epa.gov/bpspill/dispersants/subsurface-dispersant-directive-final.pdf

US EPA (2012). Ecotoxicity categories for terrestrial and aquatic organisms. (Website—updated on 10 February 2015). www.epa.gov/oppefed1/ecorisk_ders/toera_analysis_eco.htm

US FDA (2010). *NOAA and FDA announce chemical test for dispersant in Gulf seafood: all samples test within safety threshold*. US Food and Drug Administration (FDA) website archives. 29 October 2010. www.fda.gov/NewsEvents/Newsroom/PressAnnouncements/2010/ucm231653.htm

US FDA (2012). *Gulf Seafood is Safe to Eat after Oil Spill*. 'FDA Voice' — the official blog of the US Food and Drug Administration (FDA), 11 January 2012. <http://blogs.fda.gov/fdavoice/?tag=gulf-seafood>

Agradecimientos

La autoría de este documento es de Alun Lewis (Alun Lewis Consulting) y Peter Taylos (Petronia). Los autores desean agradecer a las siguientes personas que contribuyeron con sus valiosos conocimientos, opiniones y consejos para desarrollar el contenido de este documento: Gina Coelho (HDR Engineering, Inc.), Richard Santner (BP), Victoria Broje (Shell), Marty Cramer (ConocoPhillips), Anette Boye (Statoil), Tim Lunel (ITOPF), Tim Nedwed (ExxonMobil) y Tom Coolbaugh (ExxonMobil).

Esta página se ha dejado intencionalmente en blanco

Esta página se ha dejado intencionalmente en blanco

Esta página se ha dejado intencionalmente en blanco

IPIECA

IPIECA es la asociación de la industria global de hidrocarburos 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

