

La biorremediación: importante técnica para limpiar derrames de petróleo

Por R. R. Lessard, R. C. Prince, J. B. Wilkinson (Exxon Research and Engineering Company);
J. R. Bragg (Exxon Production Research Company); J. R. Clark (Exxon Biomedical Sciences, Inc.)
y R. M. Atlas (University of Louisville)

La biorremediación fue un componente importante del programa de limpieza de costas empleado en 1989, después del derrame de petróleo del Exxon Valdez en la Bahía Prince William, Alaska. Este proceso involucró la aplicación de fertilizantes en los sectores de las costas abarcados por la acción de las mareas, para estimular el crecimiento de los microbios que degradan el petróleo, que existen en forma natural y que, normalmente, se alimentan de los hidrocarburos de las coníferas y otras fuentes naturales. Estos microbios probaron ser extremadamente apropiados en su capacidad para degradar los componentes de los hidrocarburos del petróleo derramado.

Aplicado durante los veranos de 1989-1992, ha sido el proyecto de biorremediación más extenso y estudiado del mundo hasta la fecha. Los resultados son de interés para las industrias, la comunidad científica y los entes reguladores. Su éxito se originó en un intensivo programa de investigación y desarrollo de laboratorio y campo, llevado a cabo conjuntamente por la United State Environmental Protection Agency (EPA) y la empresa Exxon. El proyecto constituye un excelente modelo de esfuerzo cooperativo entre la industria y organismos de gobierno. El resumen condensado —que hoy publicamos— *Reseña de los Programas de Biorremediación de Exxon con énfasis en el derrame de Alaska* desarrolla este tema.

El 24 de marzo de 1989, el buque tanque "Exxon Valdez" encalló en el arrecife Blight, vertiendo alrededor de 41.000 toneladas (11 millones de galones) de petróleo crudo de la Vertiente Norte de Alaska sobre las aguas de la Bahía Prince William, en Alaska. Una parte de este petróleo flotó hacia la costa, haciendo impacto en muchas de las islas de la zona. En total, unos 2.100 km (1.300 millas), o sea un 15% de la ribera de la Bahía Prince William y del Golfo de Alaska resultaron, en alguna medida, empetrolados.

El empetrolamiento resultó mayor en las islas que estaban directamente en el camino de la capa oleosa (al sudoeste del sitio del derrame). Resultaba

esencial que las mayores concentraciones de petróleo fueran eliminadas tan pronto como fuera posible para minimizar su contacto con los recursos de la vida silvestre y de las pesquerías y para evitar que el petróleo fuera removido, con el riesgo de impactar sobre otras costas. La fuerza de limpieza masiva que se requería debido a lo extenso de las costas afectadas, alcanzó su máximo en 1989 con más de **11.000 trabajadores, 1.400 embarcaciones y 84 aeronaves**. Hacia mediados de setiembre de 1989, toda la costa empetrolada aprobada para la ejecución había sido tratada con uno o más procesos, incluyendo 120 km (74 millas) por biorremediación.

En el verano de 1990, la biorremediación fue la principal herramienta utilizada, tanto como medio único como en combinación con técnicas de limpieza mecánicas, tales como la reubicación de los **bermas de tormenta**, el **cultivo** de tierras, y la **remoción manual**. Hacia 1991, el empetrolamiento fue disminuido aun más, y el nivel del esfuerzo de biorremediación necesario fue solamente de alrededor de un séptimo del empleado en 1990.

Un levantamiento costero conjunto federal y provincial realizado en mayo-junio de 1992 confirmó que, esencialmente, todo el petróleo había sido eliminado de las costas. El 12 de junio de 1992, el US Coast Guard (USCG) y el Estado de Alaska declararon oficialmente concluida la limpieza, señalando que cualquier actividad suplementaria de este tipo no aportaría un beneficio ambiental neto, esto es, que otras operaciones de limpieza resultarían en más daños que beneficios.

El Proceso de Biorremediación

La biorremediación, como fuera empleada en la Bahía de Prince William y en el Golfo de Alaska, involucró la adición de fertilizantes a las playas para suplementar el nitrógeno y el fósforo, que se encontraban en disponibilidad limitada en relación a los hidrocarburos presentes (Figura 1). No se incluyeron en los fertilizantes ni trazas de metales ni otros micronutrientes, ni se agregaron microorganismos. Las bacterias invo-

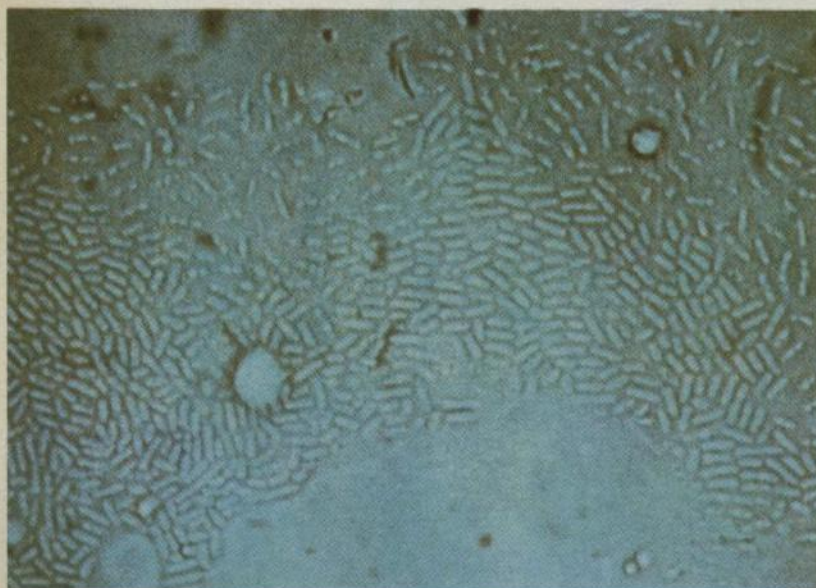


F.1 El proceso de biorremediación en Alaska involucró la adición de fertilizantes.

lucradas fueron estrictamente nativas, presentes en las riberas de Alaska. La Figura 2 es una fotomicrografía de los microorganismos identificados en el área del derrame al comenzar la limpieza. En este momento, la cantidad de degradadores de hidrocarburos había aumentado en un 10% del total de la población.

Para demostrar la eficacia y confirmar que la biorremediación sería segura, la U.S. Environmental Protection Agency (EPA) y Exxon celebraron un acuerdo de investigación conjunta y llevaron a cabo extensos programas de ensayos de campo y de laboratorio durante el verano de 1989.

El esfuerzo de la EPA se concentró en las actividades de campo: llevando a cabo ensayos piloto iniciales demostrativos de biorremediación, evaluando la eficacia de diversos fertilizantes y desarrollando los procedimientos de tratamiento para su aplicación a gran escala por Exxon, si los ensayos resultaban exitosos. El esfuerzo de Exxon, aparte del apoyo a la logística y las operaciones, estuvo dirigido a la realización de estudios de selección en laboratorio para apoyar las demostraciones de campo de la EPA. El programa de ensayos de laboratorio de Exxon estaba destinado a



F.2 Fotomicrografía de los microorganismos presentes en el sitio del derrame.

confirmar que los microbios de la Bahía Prince William degradarían el petróleo crudo de Bahía Prudhoe y a determinar cuánto más rápido se desarrollaría la biodegradación si se agregaban fertilizantes a las playas. Luego de probar diversos productos y estrategias de aplicación, se seleccionaron, para uso a gran escala, el fertilizante oleofílico Inipol EAP22 y el Customblen de grano sólido y baja liberación.

La EPA inició un ensayo de campo a principios de mayo de 1989 para identificar los sitios adecuados para los ensayos de demostración. Se seleccionaron Snug Harbor y Passage Cove, en la Isla de Knight, ya que el empetrolamiento y las condiciones geomorfológicas aparecían como apropiadas para la biorremediación (esto es, sin petróleo estancado, sustrato permeable, etc.). Ambos sitios presentaban residuos oleosos en las superficies de los cantos rodados y petróleo mezclado con la arena y la grava por debajo de los bloques rocosos. En los ocho a diez días siguientes a la aplicación de Inipol en Snug Harbor, fue visible una notable disminución del empetrolamiento en las parcelas de rodados tratados (Figura 3). Un examen más detenido de las playas mostró que gran parte del petróleo de las superficies de los rodados había desaparecido (Figura 4), pero que todavía había petróleo en la grava y la arena por debajo de la cubierta de rodados.

Los resultados del monitoreo ecológico de estos ensayos fueron también muy alentadores. Las concentraciones de nutrientes no aumentaron significativamente en las aguas adyacentes a las costas tratadas. Los análisis de clorofila de las muestras de fitoplancton demostraron que las aplicaciones de fertilizantes no tuvieron impactos detectables sobre los crecimientos algales y que los valores de clorofila estaban dentro de los rangos esperados para la Bahía Prince William. Los mejillones recogidos inmediatamente aguas afuera de los terrenos de ensayo no mostraban contaminación por hidrocarburos aromáticos policíclicos, sugiriendo que los fertilizantes no aumentaron la incorporación de compuestos de petróleo en la columna de agua. Además, no se observaron desprendimientos de petróleo a lo largo de la costa luego de la aplicación del fertilizante.

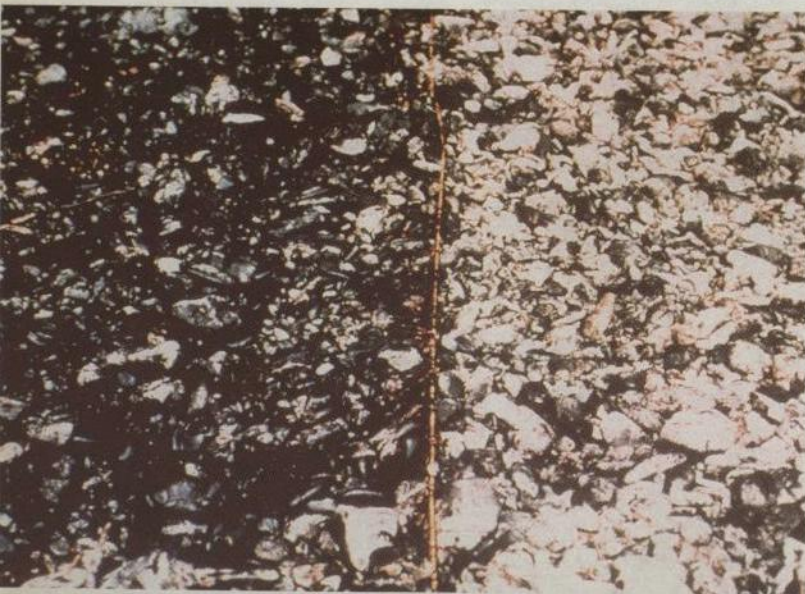
Teniendo en cuenta toda la información disponible, incluyendo los estudios microbiológicos, los cambios en la composición química del petróleo y las mejoras visibles en las costas, la EPA llegó a la conclusión de que **la biorremediación favorecía la eliminación del petróleo**. Sin embargo, la EPA no era capaz de brindar mediciones cuantitativas significativamente satisfactorias debido a la naturaleza altamente heterogénea del petróleo y el sedimento. Este tema fue planteado en subsiguientes programas de ensayos de laboratorio y en el programa de ensayos de campo de 1990. De cualquier forma, los datos obtenidos en 1989 mostraron que la biorremedia-



F.3 Fotografía mostrando que la adición de fertilizantes ha limpiado notablemente una sección de Snug Harbor.

ción resultó segura y probable de ser efectiva. Fue sobre esa base que se otorgó la aprobación por parte de las autoridades provinciales y federales para su aplicación extendida. El notable impacto sobre la recuperación de las playas queda demostrado en las Figuras 5 y 6. La Figura 5 es una fotografía que muestra la gran extensión de contaminación por petróleo en Green Island en abril de 1989. En la Figura 6 aparece la misma playa seis meses después del lavado y la aplicación del fertilizante.

En 1990, el Estado de Alaska aprobó nuevamente la biorremediación, fundamentalmente para la eliminación del petróleo subsuperficial. Sin embargo, esto era dependiente del financiamiento y de la realización, por parte de Exxon, de un programa de monitoreo de investigación conjunto con EPA y el Estado de Alaska. Ese programa, llevado a cabo en tres playas de prueba en Knight Island, resultó en el mayor acopio de datos de campo jamás reunido sobre biorremediación. Los análisis estadísticos de esa información brindaron finalmente pruebas cuantitativas de la eficacia de la biorremediación y dieron una explicación técnicamente sólida de por qué los resultados fueron mejores en una playa que en otras.



F.4 Primer plano del área fertilizada adyacente a la zona de control sin fertilizar.

La interpretación de datos

Inicialmente, Exxon y EPA encontraron problemas en brindar mediciones estadísticamente significativas de la biodegradación, basadas solamente en análisis de petróleo en sedimentos. Esto resultó ser un obstáculo mayor en la obtención de una aceptación amplia en la comunidad científica acerca de que la adición de fertilizantes a las playas había logrado en realidad la tasa de mejoramiento que se declaraba. Aunque la evidencia física de la eliminación de petróleo era muy fuerte, la verificación estadística no resultaba posible. En el ambiente dinámico de una playa, la medición del cambio con respecto al tiempo, provocado solamente por biodegradación, empleando análisis gravimétrico, resulta virtualmente imposible debido a que otros procesos físicos están produciendo, simultáneamente, **pérdida o ganancia** de petróleo. La remoción física del petróleo por procesos naturales puede producir una reducción en la carga de petróleo sin un cambio neto en la composición del mismo. De igual forma, la carga de petróleo puede aumentar localmente debido a la removilización desde los sedimentos adyacentes, aunque el petróleo esté siendo biodegradado, de modo que el uso único de mediciones gravimétricas brinda un cuadro engañoso de la eficacia de la biorremediación.

Para superar estas barreras Exxon desarrolló procedimientos para el uso de hopano como marcador adecuadamente conservado. El hopano (un compuesto de 30 carbonos) se encuentra en el crudo de Bahía Prudhoe en unas 200 ppm y, aunque puede ser biodegradado, la velocidad es extremadamente lenta comparada con la de otros hidrocarburos. Se lo encontró, por lo tanto, suficientemente estable para los propósitos de esta investigación.

Los investigadores de Exxon lograron determinar con alto grado de confianza la degradación de las especies químicas y la diferenciación entre muestras fertilizadas y sin fertilizar, mediante la medición de las cantidades residuales de las clases de compuestos de hidrocarburos en relación al hopano sin degradar.

Conclusiones

Las principales conclusiones de este estudio son las siguientes:

La aplicación de nutrientes fertilizantes resultó eficaz. La tasa de degradación del petróleo aumentó de tres a más de cinco veces por encima de la tasa de fondo.

La nueva técnica del hopano demostró con una alta confiabilidad estadística que el petróleo en playas adecuadamente fertilizadas se degradó más rápidamente que el petróleo en playas de control adyacentes sin fertilizar. Además, virtualmente todos los grupos componentes del petróleo, incluyendo la

mayor parte de los hidrocarburos aromáticos policíclicos, se degradaron simultáneamente, pero a diferentes velocidades, dependiendo de la estructura molecular.

La biorremediación resultó segura para la biota costera y los trabajadores.

Los extensivos ensayos toxicológicos de la EPA en pruebas de laboratorio y de campo, tanto como la literatura previa sobre datos en la toxicidad de los componentes de los fertilizantes, mostraron que estos fertilizantes presentaban un potencial de peligrosidad mínimo para las biotas acuáticas, aéreas o terrestres. La concentración de amoníaco, el nutriente de mayor preocupación para las especies acuáticas, nunca se extendió de 1,9 ppm en agua, medida a una profundidad de 0,5 m por encima del sedimento, la cual está bien por debajo del límite de 10 ppm fijado por las reparticiones de los EE.UU. para exposiciones de corto plazo.

El principal factor que afecta la tasa de biodegradación del petróleo resultó ser la cantidad de nitrógeno nutriente cedido al agua poral del sedimento por unidad de petróleo presente.

Los análisis estadísticos demuestran que la degradación del petróleo se correlaciona estrechamente con la concentración de nitrógeno medida en el agua poral del sedimento, con el grado de degradación previa del petróleo y con el tiempo. La cantidad de nitrógeno por unidad de petróleo fue la variable más importante. Los resultados sugieren que el aumento de la frecuencia de aplicación y la tasa de dosaje del fertilizante, consistente con el mantenimiento de niveles seguros para la biota, podrían haber aumentado aun más la tasa de biodegradación del petróleo por encima de los niveles observados en los ensayos de la Bahía Prince William.

Los nutrientes alcanzaron con eficacia el petróleo subsuperficial a partir de fertilizantes aplicados sobre la superficie de la playa.

La mayor parte del petróleo subsuperficial se encontraba en las costas con sedimentos porosos. Los datos muestran que en estas costas el líquido oleofílico Inipol y los fertilizantes sólidos Customblen fueron capaces de ceder nitrógeno a profundidades de sedimento de por lo menos 60 cm., en concentraciones útiles para el crecimiento microbiano y la degradación del petróleo subsuperficial.

Los datos de laboratorio brindaron predicciones confiables del rendimiento de la biorremediación.

Los modelos de laboratorio de las playas que emplearon los sedimentos realmente empetrolados de la Bahía Prince William dieron tasas de degradación para el petróleo subsuperficial que resultaron comparables con las tasas medidas posteriormente en el campo. Estos ensayos también demostraron que el Inipol no eliminó físicamente el petróleo de los sedimentos por otro proceso que no fuera la biodegradación.

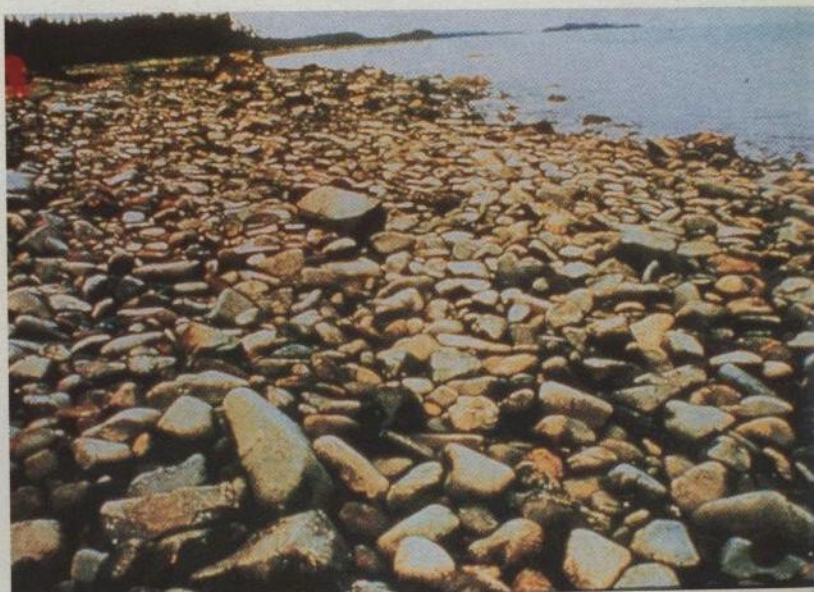


F.5 Green Island, a un mes del derrame.

¿Qué es lo que sigue?

La aplicación de la biorremediación a las playas empetroladas en Alaska ha sido reconocida como un éxito por la U.S. Environmental Protection Agency. Este éxito ha generado el interés mundial por esta tecnología. En realidad, los fertilizantes enriquecidos de nutrientes fueron usados recientemente para acelerar la recuperación de un derrame de 700 toneladas del buque tanque Presidente Arturo Umberto Illia en la terminal de Puerto Rosales en Argentina. Hasta donde llega nuestro conocimiento, ésta es sólo la segunda aplicación de fertilizantes para remediar un derrame de un buque tanque.

Los datos de campo de Alaska brindaron una extensa información acerca del rendimiento de la biorremediación en las costas de roca y grava que se encuentran en Alaska. Existe evidencia de que ésta es también efectiva en otros tipos de ambientes, tales como playas arenosas y marismas salinas, pero en estos medios se necesita de tareas adicionales para establecer enteramente la factibilidad/seguridad y cuantificar la eficacia en comparación con la degradación natural. Hay planes de nuevas tareas para extender los resultados de Alaska a otros tipos de costas.



F.6 Green Island, en octubre de 1989, después del lavado y la biorremediación.