

LA BIO-REMEDIACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN CON HIDROCARBUROS

Sandra J. Montoya

Juan C. Alvarez

Víctor H. López

Estudiantes de la carrera de Ingeniería de Petróleos

En la Línea de Profundización de Ecología y Medio Ambiente.

Alexander Concha

Juan G. García

León F. Quiñones

Osmar R. Alcalde

Fabio W. Guerra

Juan C. Rojas

RESUMEN

La actividad petrolera involucra diferentes procesos que implican riesgos ambientales, el más común de los cuales es la contaminación de los ecosistemas con hidrocarburos. Cuando se trata de volúmenes grandes y localizados, la primera actividad que se realiza es la separación física y la recolección del material, pero siempre queda un remanente difícil de recuperar. En este y en el caso de escapes continuos y dispersos se hace necesario utilizar otras técnicas de saneamiento ambiental. La bio-remediación es una técnica económica y efectiva que puede usarse en estos casos; ella se basa en la aplicación de procesos naturales que ocurren en la cadena trófica de los detritívoros en todos los ecosistemas.

Existen más de cien especies de bacterias y hongos que pueden utilizar los hidrocarburos como fuente de energía para su alimentación, reduciendo la cantidad del contaminante a niveles que no afecten las propiedades físicas, químicas y biológicas de los ecosistemas. La cepa más comúnmente utilizada pertenece a la especie *Pseudomonas aeruginosa*.

Para la correcta aplicación de esta técnica es necesario conocer aspectos tales como la naturaleza del material contaminante, las propiedades del sustrato y las comunidades de microorganismos presentes en el lugar. También se requiere un adecuado control de las condiciones ambientales, especialmente la concentración de oxígeno, la humedad, la temperatura, el pH y la concentración de algunos nutrientes en el sustrato.

ABSTRACT

The activities of the oil industry comprise many processes that represent environmental risks, usually the pollution of the ecosystems with hydrocarbons. When bulky spills occur, the first measure used for damage repair is the physical gathering, but scattered quantities of oil even remain. The last is typical of chronic leakage's when is necessary to make use of other procedures for the environmental restoration. The bioremediation is an effective and economic technique useful in these cases that rest upon natural processes of the detritivorous tropic chain in all the ecosystems.

There are over one-hundred species of bacteria and fungi able to profit the hydrocarbons as energy source for feeding, diminishing the pollutant to levels harmless to the physical, chemical and biological properties of the ecosystems. The current weariest stock belongs to the bacteria species *Pseudomonas aeruginosa*.

To apply properly this technique is necessary to know the nature of the pollutant, the properties of the substratum and the indigenous microbiological communities. Moreover it is required to control the environmental conditions, mainly aeration, moisture, temperature, pH, and nutrients status of the substratum.

INTRODUCCIÓN

La actividad económica del último siglo se ha caracterizado por el consumo de grandes cantidades de combustibles fósiles. Una gran parte del actual desarrollo tecnológico se debe a estos recursos energéticos, lo cual les ha conferido un papel estratégico en el marco económico y político mundial, constituyendo una gama diversa de productos y aplicaciones. Pero debido a que los países más consumidores suelen estar alejados de los países productores, el transporte tiene gran importancia en el cómputo de los riesgos de contaminación, especialmente en el caso del petróleo y sus derivados. El transporte se lleva a cabo normalmente en barcos de gran tonelaje (mas de 100.000 Tm de crudo), y por ello, cualquier accidente que pueda ocurrir da lugar al derrame de un elevado volumen en el mar, lo cual produce graves desastres ecológicos locales.

Entre los accidentes ocurridos en los últimos años se destacan: “el Tampico Maru” cerca de la baja California, el “Ocean Ego” en el puerto de San Juan (Pto. Rico), el “Florida” en las costas de Massachusctts, el “Amoco Cádiz” que derramó

223.000 Tm sobre las costas de la Bretaña Francesa en una longitud de 400 Km. de costa, el “Andros Patria” en Galicia, y el accidente del tanque carguero “Exxon Valdez”, el mayor derrame de crudo en la historia ala cual se han aplicado procesos de biorremediación, ocurrido el 24 de marzo de 1989, que derramó más de ocho millones de barriles en la costa pacífica en Alaska.

Hay que considerar también los escapes procedentes de torres extractoras marinas en plataformas continentales, tal como ocurrió recientemente en el golfo de México. Tanto en un caso como en el otro, por el volumen derramado y por ser muy localizado y en zonas próximas a la costa, estos accidentes llaman poderosamente la atención de los medios de comunicación y la sociedad en general, ya que sus efectos son fácilmente observables (peces y aves marinas muertas, costas y playas inutilizadas, etc.).

Si embargo y a pesar de su elevada magnitud, se estima que tales accidentes contribuyen en un pequeño porcentaje a la llegada total de contaminantes a los océanos. En la Tabla 1 puede observarse, que los accidentes señalados anteriormente, sólo contribuyen a un 6.27% del total.

TABLA 1. Contribución de distintas fuentes a la contaminación con hidrocarburos derivados del petróleo introducidos en los océanos.

ORIGEN	VOLUMEN	INTERVALO	PORCENTAJE
Filtraciones Naturales	0.6	0.2-1.0	9.8
Producción mar adentro	0.08	0.08-0.15	1.3
<i>Transporte</i>			
Lot	0.31	0.15-0.4	5.1
No lot	0.77	0.65-1.0	12.6
Operaciones en dique seco	0.25	0.2-0.3	4.1
Operaciones Terminales	0.003	0.0015-0.005	0.1
Fugas en Depósitos	0.5	0.4-0.7	8.2
Accidentes de Petroleros	0.2	0.12-0.25	3.3
Accidentes de no petroleros	0.1	0.02-0.15	1.6
Refinerías	0.2	0.2-0.3	3.3
Atmósfera	0.6	0.4-0.8	9.8
Residuos Municipales	0.3		4.9
Residuos Industriales	0.3		4.9
Desagües Urbanos	0.3	0.1-0.5	4.9
Desagües de ríos	1.6		2.2
TOTAL	6.113		100%

Fuente: Tomada de tratamiento de mareas negras I. Origen, Extensión y Movimiento. Bergueiro, J.R., et all.

De todas las causas mediante las que pueda derramarse petróleo crudo o sus derivados al mar, se estima que en torno a un 75% corresponden a errores humanos, siendo el resto consecuencia de averías en equipos y otros imponderables. Por lo tanto las mejoras en el adiestramiento de personal, en equipos y en métodos de trabajo hacen posible concebir

esperanzas de una reducción sustancial del total de contaminantes que ingresan al mar. En la Tabla 2 se puede apreciar el resultado de los esfuerzos hechos para reducir la cantidad de crudo llegado al mar en los Estados Unidos en la década de los 80, comparado con las cifras de 1970.

TABLA 2. Estimación de la cantidad de hidrocarburos de petróleo que llegan anualmente al mar en Estados Unidos en 1970 y durante la década de los 80.

FUENTE	Millones 1970	Toneladas/año * 1980
Transporte marino	2133	0.8
Extracción en plataformas marinas	0.08	0.2
Refinerías costeras	0.2	0.02
Residuos industriales	0.3	0.45
Residuos municipales	0.3	0.3
Desagües urbanos	0.3	0.3
Desagües de ríos	1.6	1.6
Filtraciones naturales	0.6	0.6
Atmósfera	0.6	0.6
	6113	4.57

Fuente: Tomada de tratamiento de mareas negras I. Origen, extensión y movimiento. Bergueiro, J.R., et al.

* Basado en estimaciones de la National Academy of Sciences

El impacto de la industria petrolera en los ecosistemas daña actividades económicas como la pesca y la agricultura tradicional, que siempre han sido las principales fuentes de subsistencia de las comunidades humanas. Se han destruido también, o están amenazadas, comunidades vegetales completas como los manglares.

Las actividades realizadas y las características de los productos manejados por la industria petrolera presentan altos riesgos de contaminación. Las alteraciones al medio ambiente se inician con los trabajos exploratorios. Las brigadas sismológicas encargadas de realizar estos trabajos abren brechas y usan explosivos que ocasionan alteraciones al medio físico y en algunos casos dañan las construcciones de comunidades y pueblos.

Posteriormente en el proceso de perforación se construyen caminos hacia los pozos, se rellena el terreno donde se instalará el equipo de perforación y comienza el tráfico de maquinaria pesada que traslada toneladas de equipo y tubería. El tráfico intenso de los vehículos utilizados en el transporte destruye caminos vecinales y afecta a las viviendas por efecto de las vibraciones.

Una vez concluida la perforación e iniciada la producción, la contaminación se genera en los quemadores de las baterías de separación de crudo y gas. Las emisiones de

gas y otras sustancias van a la atmósfera y se convierten en lluvia ácida, que no solo provoca corrosión de metales sino que también afecta los cultivos.

Otra fuente de contaminación es el sistema de recuperación secundaria o mejorada, que opera para extraer hidrocarburos remanentes. Estas intervenciones que se llevan a cabo en pozos con grado avanzado de explotación, consisten en la inyección de agua y otras sustancias que, una vez concluido el proceso son expulsadas al medio ambiente.

Por otra parte, el petróleo crudo y el gas es transportado por una vasta red de ductos hacia los centros de procesamiento petroquímico, de refinación y de consumo. Estas tuberías, en algunos casos, cuentan con muchos años de antigüedad y no reciben el mantenimiento adecuado, por ello son constantes los derrames de crudo, que afectan cultivos y cuerpos de agua.

Algunas instalaciones petroleras por falta de medidas preventivas, durante la ejecución de las diferentes etapas de la explotación petrolera, han provocado impactos en los recursos naturales, tales como, degradación de la vegetación, salinización de la tierra, degradación física de los suelos, degradación

química incluyendo acidificación, deterioro de la materia orgánica y contaminación por hidrocarburos.

En Colombia, debido al conflicto socio-político que afecta al país, se añade como un factor de riesgo ambiental el derrame de petróleo originado por la voladura de oleoductos, que ha llegado a afectar seriamente algunas regiones. Al finalizar 1997 se habían derramado 649.789 barriles en 497 atentados, según las estadísticas de ACIPET. Por otra parte, en 1987 se informó que durante las operaciones de cargue de hidrocarburos en el puerto petrolero del Golfo de Morrosquillo se habían derramado aproximadamente 3500 barriles debido a fallas en el transporte.

También se produce contaminación ambiental en el almacenamiento de los derivados del petróleo por parte de las empresas distribuidoras de combustible, debido al deterioro de los tanques subterráneos, lo cual suele afectar las aguas freáticas. Otra fuente de contaminación la constituyen los talleres de mecánica automotriz, los cuales no suelen tener ningún control en la disposición de los desechos y que son además difíciles de ubicar y cuantificar.

La extensión que ha alcanzado el problema de la contaminación de las aguas y los suelos con hidrocarburos ha llevado a una creciente preocupación en la opinión pública acerca de la necesidad de tomar medidas para corregir esta situación. La selección de las alternativas óptimas de recuperación para cada caso con base en los

procedimientos de evaluación de la viabilidad tanto técnica como económica, es prioritaria para el desarrollo de esta actividad. Entre las alternativas de recuperación ambiental que suponen un tratamiento del suelo y del agua para reducir los niveles de contaminación, el tratamiento biológico o bio-remediación se presenta como una alternativa económica, versátil y capaz de contribuir de manera importante a la solución del problema.

COMPORTAMIENTO DEL CRUDO EN LOS DERRAMES

El término petróleo se usa generalmente para describir una amplia variedad de sustancias naturales tanto de origen vegetal, animal o mineral, así como los compuestos sintéticos derivados de ellos. El crudo de petróleo varía tanto en su composición química como en el color, viscosidad, peso específico y cualquier otra propiedad física o química, según su origen. Estas propiedades influyen no sólo en la comercialización del crudo sino también en los problemas ambientales que puede producir cuando se vierte sin control al ambiente, y en las medidas que es posible tomar para corregir los problemas derivados de la contaminación.

Algunas características del crudo del petróleo y de sus derivados se indican en la Tabla 3.

TABLA 3. Comparación de características físicas del crudo de petróleo y de algunos productos derivados de petróleo de refinería.

Hidrocarburo	Peso específico 15°C	Grados API 15°C	Viscosidad cps 38°C	Punto Vertido °C	Punto Inflamación °C	Punto Ebullición °C
Crudo de petróleo	0.8-0.9	5-40	20-1000	-35 a 10	Variable	30-500
Gasolinas	0.65-0.75	60	4-10		-40	30-200
Kerosenos	0.8	50	1.5		+55	160-290
Fuel de avión	0.8	48	1.5	-40	55	160-290
Fuel-oil N°2 (hornos, motores, Diesel, Estufas)	0.85	30	15	-20	55	180-360
Fuel-oil N°4 (Central Térmica)	0.9	25	50	-10	60	180-360
Fuel-oil N°5 (Bunker B)	0.95	12	100	-5	65	180-360
Fuel-oil N°6 (Bunker C)	0.98	10	300-3000	+2	80	180-360

Fuente Tomada de tratamiento de mareas negras I. Origen, extensión y movimiento. Bergueiro, J.R., et al.

El peso específico relativo afecta al movimiento del derrame, su extensión y dispersión en el agua, la cual se incrementa en función del tiempo como consecuencia de los procesos de evaporación y envejecimiento.

La tensión superficial junto con la viscosidad, afecta también la extensión del crudo derramado, tanto en la superficie del agua, como en la arena de la playa o en el suelo. Cuanto menor es la tensión superficial del crudo, mayor es su velocidad potencial de esparcimiento. Cuando mayor es la temperatura del crudo derramado, menor es la tensión superficial del crudo y, por lo tanto, es mayor la velocidad de esparcimiento.

La viscosidad depende de la temperatura ambiente, de manera que a menor temperatura mayor es la viscosidad de un crudo. La viscosidad, la tensión superficial y el peso específico de un crudo sufren un profundo cambio durante los procesos de envejecimiento del derrame. La viscosidad influye en la velocidad de esparcimiento, grosor final de la mancha, penetración del crudo en los sedimentos de las playas y costas, y en la mayor o menor facilidad de bombeo de crudo, para retirarlo de la superficie contaminada.

El punto de vertido es la temperatura a la cual un crudo deja de fluir. Esto se debe a que el crudo adquiere una estructura plástica o semisólida, como consecuencia de la formación interna de una estructura microcristalina, lo cual anula los efectos de la viscosidad y la tensión superficial. En general, el punto de vertido de crudo esta comprendido entre -57 y $+32^{\circ}\text{C}$. Los crudos más ligeros son los que tienen menor punto de vertido. La gasolina y las demás fracciones ligeras están normalmente a una temperatura superior a la de vertido, mientras que las fracciones pesadas están normalmente por debajo del punto de vertido y solo fluirán cuando la temperatura ambiente es suficientemente alta ($15-20^{\circ}\text{C}$). Como consecuencia, si la temperatura de la costa no es elevada, las gasolinas y fracciones ligeras penetran fácilmente en la arena, mientras que las pesadas permanecen sobre ellas, donde se pueden recoger mecánicamente.

El punto de inflamación es un factor muy importante en relación con la seguridad en las operaciones de limpieza. El peligro de inflamación es mucho mayor cuando predominan las fracciones ligeras, mientras que si

en el crudo son mas abundantes las fracciones pesadas (Crudo Bunker C), tal peligro de inflamación no existe.

La solubilidad también afecta el comportamiento del crudo en los derrames. Las fracciones más solubles suelen ser las más ligeras, mientras que las más insolubles son las fracciones pesadas, por lo que las primeras son las más nocivas para los microorganismos.

BIO-REMEDIACIÓN DE DERRAMES DE HIDROCARBUROS

La separación física y la recolección del crudo es la primera actividad que se suele realizar cuando los derrames son voluminosos y provienen de una fuente localizada; en algunos tipos de costa, estas actividades pueden ocasionar igual o mayor daño físico y ecológico que el causado por la contaminación misma. La decisión de iniciar operaciones de limpieza y restauración de áreas contaminadas de crudo de petróleo tiene que basarse en una cuidadosa evaluación de factores socioeconómicos, ecológicos y estéticos. Hay que tener algunos criterios para tomar esta importante decisión, tales como la sensibilidad costera, el comportamiento del crudo en zonas costeras, la protección de las costas y los métodos de restauración.

Cuando el crudo ha contaminado playas en regiones pobladas o en zonas de uso recreativo, la prioridad y premura de las operaciones de limpieza difieren de las que se realizarían cuando la contaminación tiene lugar en áreas no habitadas. Si una costa es usada por el público, el tiempo requerido para la eliminación del crudo por procesos naturales puede ser inaceptable, y el acometimiento de las operaciones de limpieza debe ser inmediato a pesar de las posibles implicaciones ecológicas.

Algunas zonas, pueden limpiarse a si mismas por procesos de envejecimiento, abrasión, dispersión, o degradación. Las pérdidas asociadas con procesos oxidativos químicos y fotoquímicos, dependen de la disponibilidad de oxígeno, de la intensidad de la luz solar, y del grosor de la película de crudo. Por otra parte, el ataque bacteriano depende de la presencia de oxígeno en el sustrato, de la temperatura y del área superficial del crudo.

Para la limpieza y restauración de la costa se pueden

utilizar los siguientes procedimientos: dispersión química e hidráulica, chorros de vapor y agua a presión, mezcla del crudo derramado con el sustrato, al igual que la eliminación física. Sin embargo, los procedimientos más drásticos deberían omitirse en muchos casos porque causan tanto daño a la biota como el derrame mismo. En algunos casos, se han hecho grandes esfuerzos por rescatar animales y someterlos a un proceso de limpieza, pero la experiencia ha mostrado que la rehabilitación de animales es costosa y poco efectiva, de modo que debe reservarse para el caso de especies amenazadas o en peligro de extinción.

La biorremediación es una técnica de recuperación ambiental que utiliza microorganismos o procesos microbianos para degradar y transformar compuestos orgánicos en suelos contaminados, mantos acuíferos, lodos y residuos sedimentales. Se ha demostrado que la biodegradación es el proceso más efectivo para la purificación de efluentes, la eliminación de residuos de la industria petrolera y la descontaminación de ambientes crónica o accidentalmente contaminados con hidrocarburos. Los ambientes crónicamente contaminados han permitido a través del tiempo la evolución de poblaciones microbianas autóctonas adaptadas a dichos contaminantes y por lo tanto constituyen los nichos ecológicos más adecuados para el aislamiento de cepas con alta capacidad degradadora.

Para facilitar el estudio de los contaminantes en materia de bio-remediación, se clasifica a los compuestos contaminantes como biodegradables persistentes o recalcitrantes, siendo los biodegradables aquellos susceptibles a una transformación biológica por medio de un compuesto químico orgánico a otro compuesto, el cual puede ser mineralizado. El término recalcitrante se refiere a un compuesto que ofrece resistencia a la biodegradación y que solo podrá ser degradado bajo ciertas condiciones muy específicas.

Los sitios contaminados de manera recalcitrante, contienen mezclas complejas de compuestos orgánicos como el creosote, combustibles, combinaciones de solventes industriales y petróleo crudo, entre otros elementos. Las concentraciones de cada contaminante varían según el sitio contaminado por esta razón la biodegradación del petróleo en ecosistemas naturales es complicada, por lo que muchas de las experiencias de descontaminación se

han centrado en ambientes marinos, aunque también se han realizado trabajos sobre algunos suelos contaminados.

La incineración es el método más sencillo para limpiar suelos contaminados con petróleo, sin embargo, una opción alternativa es la bio-remediación con la cual se enriquecen los suelos con nutrientes como ácido fosfórico o nitrógeno, elementos que favorecen el desarrollo de los microorganismos propios del suelo.

BACTERIAS DEGRADADORAS DE HIDROCARBUROS AISLADAS EN SUELOS CONTAMINADOS

Existen más de 100 especies en 30 géneros de bacterias y hongos que pueden metabolizar hidrocarburos y limpiar suelos contaminados, porque poseen la batería enzimática necesaria para degradar una amplia variedad de hidrocarburos poliaromáticos con diversas estructuras.

La recuperación de un ambiente contaminado con hidrocarburos por medio de la bio-remediación, exige un adecuado estudio y una caracterización de los microorganismos presentes. En la actualidad se han logrado aislar bacterias degradadoras de hidrocarburos de suelos contaminados, se han cultivado en el laboratorio y se han alimentado con un hidrocarburo puro como única fuente de carbono. La matriz utilizada en este estudio fue un suelo obtenido del *land farming* de Refinería San Lorenzo, industria petrolera ubicada en la ciudad de San Lorenzo, Provincia de Santa Fe, Argentina, con una antigüedad de 15 años. En el estudio se obtuvieron colonias que crecían en medio sólido con n-hexadecano; también podían crecer con el extractable etéreo obtenido del suelo contaminado. La única cepa identificada fue perteneció a la bacteria *Pseudomonas aeruginosa*. Dichas bacterias podrían utilizarse para degradar hidrocarburos en suelos contaminados, una vez propagadas en laboratorio y posteriormente inoculadas al suelo.

La Antártida constituye una fuente inexplorada de microorganismos sictotróficos para su aplicación a procesos de descontaminación de residuos de la industria petrolera a bajas temperaturas, se han aislado dos cepas sictotróficas: B₂₋₂ (Riachuelo, Bs.As.) y ADH-1 (Arch. Shetland del Sur, Antártida), se han realizado estudios a partir de derrames simulados de gas-oil en suelos sometidos a las

condiciones climáticas imperantes, estos análisis aun están en curso. También se inició el análisis de muestras de suelo obtenidas en la Campaña Antártica de Verano 1995-1996, en dos bases antárticas argentinas que sufrieron problemas de derrames de gas-oil: Base Vicecomodoro Marambio y Base Teniente Jubany a fin de determinar el recuento de bacterias sicotróficas heterótrofas totales y de degradadoras de hidrocarburos.

La bio-remediación tiene la ventaja de ser un método de recuperación de terrenos relativamente barato y menos agresivo para el ambiente que los métodos convencionales. En la Tabla 4 se resumen las características básicas de los componentes del proceso de bio-remediación que deben tenerse en cuenta para decidir si es posible llevar a cabo esta técnica de manera efectiva en cualquier caso.

TABLA 4. Características básicas de los componentes del proceso de bio-remediación.

COMPONENTE	CARACTERÍSTICAS
Fuente de carbono	Comúnmente mezcla de compuestos tales como petróleo, gasolina y otros hidrocarburos específicos,
Asociación microbiana	Bacterias y hongos, aunque también puede haber algas y levaduras, entre otros. La combinación cambia de acuerdo con el tipo de nutrientes y las condiciones ambientales.
Nutrientes	Es necesario el suministro de nitrógeno (amonio, nitratos, úrea), y fósforo (fosfatos), además de oxígeno, y otros elementos (calcio, hierro, etc.)
Agua	Es un requisito fundamental en el proceso. Por lo menos se requiere que el sustrato se mantenga húmedo.
Metales	En altas concentraciones inhiben el proceso.
Condiciones ambientales	En el suelo el proceso sólo opera en intervalos restringidos de pH y temperatura. Cambios drásticos en las condiciones ambientales pueden afectar negativamente el proceso.
Productos de la biodegradación	Bajo condiciones aeróbicas se produce biomasa y dióxido de carbono principalmente. Bajo condiciones anaeróbicas además de los anteriores se produce una mezcla de compuestos orgánicos como alcohol, acetona, metano, sulfuro de hidrógeno, y ácidos orgánicos.

Existen muchas formas de aplicar la bio-remediación, lo cual ha dado lugar a diferentes tipos de procesos, que varían según su aplicación, desde condiciones de laboratorio hasta condiciones *in situ* en suelos y en ambientes marinos. En la Tabla 5 se muestra la gama de procesos que pueden utilizarse.

CONCLUSIONES

El suelo, las corrientes y los depósitos de agua superficiales y subterráneos, y la atmósfera son constituyentes fundamentales del ambiente que pueden sufrir alteraciones debido a las actividades petroleras, y es necesario garantizar su protección durante todo el proceso de perforación, extracción,

transporte, refinamiento y distribución del crudo y sus derivados. Estas actividades conllevan unos riesgos que es posible prever y evitar, o al menos disminuir, mediante el estudio y evaluación del impacto ambiental en cada parte del proceso. Aunque los derrames durante el transporte, accidentales o provocados, son los casos más llamativos, no constituyen sin embargo las causas mayores de contaminación. Ellos ocurren en forma localizada, y aunque causan graves daños puntuales, son susceptibles de corregir en buena parte por medios físicos. Otras fuentes más continuas y abundantes causan más problemas al ambiente porque contaminan en forma lenta y progresiva y son difíciles de ubicar:

TABLA 5. Variantes del proceso de bio-remediación que pueden aplicarse atendiendo a las condiciones locales.

TIPO DE PROCESO	CARACTERÍSTICAS
Biolabranza (<i>Land farming</i>)	Una mezcla de suelo con hidrocarburos, a la que se añaden nutrientes y se le efectúa una labranza controlada <i>in situ</i> .
Suelo lodoso en tanques o lagunas (<i>Soil slurry</i>)	Suelo mezclado con agua agitado en un reactor.
Restauración del subsuelo	Agua, nutrientes y oxígeno bombeados al subsuelo. En casos extremos de escasez de oxígeno se utiliza peróxido de hidrógeno.
Tratamiento de suelos	Se utiliza un lavado para solubilizar los contaminantes absorbidos.
Digestión (<i>Reactor batch</i>)	Digestión microbiana en suspensión líquida.
Tratamiento de aguas	Utiliza microorganismos libres y/o inmovilizados en un sistema de flujo continuo.
Bioreactor de película fija	Microorganismos inmovilizados adheridos a un soporte plástico en columnas o disco.

Luego de que se han aplicado todos los correctivos posibles por medios físicos, una buena alternativa para recuperar el ambiente contaminado por hidrocarburos, especialmente cuando las cantidades no son abundantes y se encuentran dispersas, es la bio-remediación. Esta es una alternativa eficiente y barata que se basa en procesos naturales, como es el reciclamiento de la materia orgánica por parte de los detritívoros en todos los ecosistemas. En la actualidad se han logrado aislar bacterias degradadoras de hidrocarburos de suelos contaminados. Existen más de 100 especies de bacterias y hongos que pueden metabolizar hidrocarburos y limpiar suelos contaminados.

Para la correcta aplicación de esta técnica es necesario conocer aspectos como la naturaleza del material contaminante (que afecta su biodegradabilidad), las propiedades del sustrato (suelo, sedimentos, o agua), y la comunidad de microorganismos presentes en el lugar. Las diferentes variantes de la técnica requieren durante su desarrollo un adecuado control de las condiciones ambientales, especialmente la concentración de oxígeno (que afecta la eficiencia de los procesos aeróbicos), el grado de humedad, la temperatura, el pH y la concentración de algunos nutrientes en el sustrato (principalmente nitrógeno y fósforo).

Todo proceso de recuperación ambiental es costoso y complejo, por lo cual los esfuerzos de la protección ambiental deberán dirigirse principalmente hacia la prevención. En esta caso, una parte importante de la prevención debe centrarse en la conservación y el ahorro de energía, considerando que un cambio de actitud en los patrones de consumo se reflejará en

una disminución de la demanda de hidrocarburos y por tanto de los riesgos asociados a todo el proceso desde su extracción hasta la distribución.

BIBLIOGRAFIA

- BELLOSO, Claudio y CARRARIO Javier. 1998. Bacterias Degradadoras de Hidrocarburos Aisladas en Suelos Contaminados. XXVI Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y ambiental. Noviembre 1-5 de
- BERGUEIRO, J.R., F. DOMÍNGUEZ y A. MULET. 1982 Tratamiento de Mareas Negras. I. Origen, Extensión y Movimiento.. Ingeniería Química – Diciembre: 85-93.
- BONILLA, Alberto y CUESTA Pedro. 1996. Recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos. Ingeniería Química, Junio: 161-167.
- CERMEÑO Jose Luis y MARTÍNEZ Pedro. 1998. Bio-remediación con el producto Eoicasorb en un ultisol de sabana afectado por derrame de petróleo. Petroleum, Septiembre: 33-35.
- CHURCH, G.J. 1989. The big spill. Time 10: 38-41.
- ESTES, J.A. 1991. Catastrophes and conservation: Lessons from the sea otters and the Exxon Valdés. Science 254: 1596.
- FRAILE, Elda Rosa. Aislamiento y aplicación de microorganismos degradadores de hidrocarburos al tratamiento de efluentes y residuos de la industria petrolera. Cátedra de Microbiología Industrial y Biotecnología.

FRAILE, Elda Rosa y Laura N. Ríos M. Comunidades microbianas autóctonas sictotóficas en áreas contaminadas con hidrocarburos. Su aplicación en procesos de biodegradación. Cátedra de Microbiología Industrial y Biotecnología. Facultad de Farmacia y Bioquímica.

GOROSTIZA, I. et al. 1995. Bio-recuperación de suelos contaminados. Ingeniería Química, Junio: 153-157.

HOLLOWAY, M. 1991. Soiled shores. Scientific American: 102-116.

PÁRAMO, Jesús. 1992. Crudos y derivados.

Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

PERALTA, María del Rosario. Biorremediación o a la zaga de las bacterias devoradoras de oro negro. Departamento de Biotecnología de la UAM. Iztapalapa.

ORDÓÑEZ, Víctor Hugo. 1996. Bio-remediación de residuos petroleros. Tecnificación de un proceso de degradación natural. Petroleum N° 96, Marzo: 23-26.

WEISS, Stefan Arriaga. Impactos de las actividades productivas en las áreas naturales protegidas del sureste de México. Oilwatch Tabasco/Greenpeace México.

