

1012 .

Restauración ambiental.

58

CARLOS ROCHA

*Departamento
de Biología
Celular*

UNIVERSIDAD
SIMÓN BOLÍVAR

- ¹ La contaminación ambiental en el planeta ha venido acelerándose en una suerte de progresión geométrica. Por un lado, la falta de legislación coherente, el aumento de la población, la pobreza, el desconocimiento técnico y gerencial para detener y rescatar el ambiente y la ausencia de educación ecológica en la mayoría de los países del tercer mundo y por el otro, el descontrolado proceso de industrialización y los voraces intereses políticos y económicos de los países del primer mundo han venido afectando exponencialmente tanto la calidad de vida de las especies como la capacidad del ambiente para sustentar la vida. En ambos casos, se suma el profundo desconocimiento del delicado equilibrio de la naturaleza, lo cual está dejando una huella ambiental sin precedentes y de consecuencias todavía impredecibles.
- ² En la actualidad, la globalización y el avance de las comunicaciones ha elevado la contaminación ambiental a un estatus de interés internacional. No hay duda de que la contaminación ambiental está afectando la forma en que vivimos y condicionando la existencia de las especies. La calidad de vida ya no puede ser visualizada, simplemente, en términos del mejoramiento de las condiciones y estilo de vida del hombre (FRANHEIN 1975) sino, más ampliamente, con respecto al bienestar ético, moral y material en forma creciente y sostenida y en equilibrio con la naturaleza (VILADRICH 1977). El desarrollo sostenido debe igualmente contemplar la calidad de vida del resto de las especies, lo contrario contrapone la calidad del ambiente con la calidad de vida del hombre. El uso sostenible de la biodiversidad implica la necesidad de proteger las plantas y los animales de los efectos del deterioro ambiental y entenderla como un recurso natural no renovable si se impacta en forma negativa e irreversible (BUROZ 1998).
- ³ Se ha planteado que el tema de la contaminación está matizado por verdades a medias y por intereses políticos. Se trata de enseñar sólo los hechos y de adaptar los intereses ambientalistas a un contexto ecológico y económico más amplio; es decir, tomando en cuenta la realidad social. Asimismo, se busca comprender que no todas las actividades modernas son perjudiciales y que no todos los esfuerzos ambientalistas son positivos. Por ejemplo, el reciclado del papel podría reducir la tala de árboles, pero aumentaría el consumo de energía y agua; la prohibición de los productos clorofluorocarbonados (CFC) si bien contribuye a detener la destrucción de la capa de ozono, restringe la disponibilidad de refrigeración necesaria para preservar los alimentos y medicinas.
- ⁴ La biodiversidad microbiana, se refiere al mundo, casi desconocido, de las especies bacterianas, hongos y otros microorganismos actualmente existentes en la naturaleza. Ella nos invita a un nuevo debate relativo al efecto de la contaminación ambiental sobre la suerte de los microorganismos y, particularmente, sobre la capacidad de generar presión selectiva y estimular o inhibir grupos microbianos acorde a sus propiedades metabólicas o adaptativas. La «Microbiología del Ambar» considera, inclusive, la posibilidad de recuperar microorganismos en estado latente (en forma de esporas) que han sido fosilizados hace millones de años y los cuales creíamos extintos o ni siquiera imaginábamos.

- ⁵ Los microbios, fundamentalmente las bacterias, poseen una alta capacidad de adaptación, lo cual han demostrado durante miles de millones de años. Si bien la biodiversidad microbiana no se preocupa por la extinción de las bacterias, hongos u otros microorganismos, sí considera sus notorias propiedades para sobreponerse a las demandas del ambiente y la forma como afecta el entorno.
- ⁶ Otro aspecto que evidencia la evolución del enfoque ambientalista es la priorización de la restauración. En la actualidad, la restauración ambiental se ha convertido en una urgente necesidad. El efecto de la contaminación ha sido tan nocivo sobre nuestro entorno que hay que restaurarlo para poder preservarlo.

RESTAURACIÓN AMBIENTAL

- ⁷ El repunte de la restauración ambiental o ecológica es relativamente reciente y tiene su auge en la última década. Consiste en el desarrollo de tácticas, logísticas y desarrollo o refinamiento de tecnologías que permitan rescatar y responder a un amplio y creciente rango de problemas ambientales. Es decir, va más allá del simple empleo de técnicas de descontaminación o destoxificación e incluye una visión integral de recuperación del ambiente. La restauración ambiental trasciende el dominio tradicional de los ecólogos, e incluye a investigadores de todas las disciplinas, entes gubernamentales, asociaciones privadas sin fines de lucro, estudiantes, firmas consultoras, empresas e industrias. Se trata de una estrategia distinta a los enfoques previos tradicionales; es una aproximación global, concertada y más adaptada a la realidad social. Este concepto no significa que se renuncie a proteger el ambiente o a prevenir futuros daños ecológicos; tampoco que se abandone la aspiración de mejorarlo. Se trata de dar respuesta especializada a un aspecto de la contaminación ambiental que requiere atención urgente.
- ⁸ La restauración ambiental no pretende diluir los esfuerzos destinados al mantenimiento de la biodiversidad o conservación de los recursos fundamentales. Por el contrario, se debe entender que el rescate del ambiente permitirá, a futuro, reducir el peligro de extinción de muchas especies y, por ende, a conservar la biodiversidad y calidad de vida del hombre. Preservar el ambiente ya no parece ser suficiente, debemos desarrollar tecnologías que nos permitan restaurarlo. Brown (1986) señala que un recurso actualmente protegido o conservado puede siempre ser amenazado en el futuro, por lo que se requiere de una constante vigilancia y planes de contingencia a través de la restauración ambiental. Asimismo, la restauración ecológica permite recuperar recursos marginados por la contaminación ambiental, lo cual protege o conserva indirectamente el resto de los recursos ambientales todavía intactos que de otra forma serían igualmente impactados (BERGER 1990).
- ⁹ La restauración ambiental involucra una serie de tecnologías tradicionales y otras emergentes, tales como las que se han desarrollado dentro del moderno contexto de la bioingeniería y particularmente la biorremediación. Esta última implica no sólo el restablecimiento de la biodiversidad, sino también el rescate de la dinámica ambiental, la cual considera los patrones de conducta intra e inter especie y las relaciones espaciales de las especies en el ambiente.
- ¹⁰ En la medida en que la recuperación del ambiente sea una actividad económica rentable, junto al surgimiento de nuevas tecnologías socialmente aceptables y la implementación de legislaciones que obliguen al rescate de los recursos deteriorados, la restauración ambiental se convertirá en parte globalizada de la actividad del nuevo milenio.

CONSERVACIÓN AMBIENTAL

- ¹¹ Se puede entender la conservación del ambiente como un algoritmo matemático que en una suerte de ecuación define al producto como la sumatoria de los factores intervinientes. Esta propuesta serviría para explicar la gran confusión de términos y conceptos asociados al campo ambientalista. Así: «conservación ambiental = restauración + protección + mejoramiento»; es decir, la sumatoria de la recuperación del ambiente a su forma original, la salvaguarda del entorno recuperado, en vías de recuperación o intacto, así como la adición en el ambiente de nuevas propiedades beneficiosas e inexistentes antes de ocurrir la impactación.
- ¹² Por otro lado, podría establecerse que la «restauración = destoxificación + recuperación». En algunos casos, sólo basta con eliminar la presencia del agente contaminante para restaurar el ambiente, sobre todo cuando el impacto ambiental ha sido ocasional, accidental, reciente y poco extenso; por lo tanto, la ecuación se reduciría a «restauración ambiental = destoxificación». Bajo tales circunstancias, se visualiza la restauración ambiental como equivalente a la técnica empleada para remover el contaminante, esto es la acepción correcta de muchos enfoques, tales como «quimiorrestauración = oxidación química o pirólisis» para denotar el proceso de restauración ambiental.
- ¹³ Otra forma de expresión común sería la «biorrestauración = biorremediación» como supuesto equivalente de la restauración ambiental. Esto tendría sentido bajo las premisas antes establecidas; es decir, sólo si la simple remoción del agente contaminante permite restaurar el ambiente en forma integral.
- ¹⁴ Sin embargo, puede suceder que el daño ecológico sea el producto de prácticas industriales incorrectas y frecuentes que han ocasionado grave impacto ambiental. En tal situación, la restauración ambiental sería la sumatoria del proceso de destoxificación (mediante alguna de las técnicas físicas, químicas o biológicas) y la recuperación del ambiente (una vez que se ha removido el agente contaminante y se ha restablecido el entorno a su situación original).
- ¹⁵ Resulta importante destacar que la mayoría de los casos de impacto ambiental están siendo abordados, en la actualidad, a través de procedimientos fundamentalmente biológicos, por lo que se puede asumir que la biorrestauración ambiental se ha constituido en la función principal y prioritaria dentro de la ecuación de conservación ambiental. De esto se deriva que, según nuestro algoritmo inicial, deben de existir formas biológicas de recuperación del ambiente, una vez que se ha removido al contaminante, por métodos microbiológicos o biorremediación.
- ¹⁶ Por ejemplo, la reforestación por bioingeniería del suelo (donde el tipo de flora, el cronograma y la técnica de plantación son importantes), la incorporación de la fauna desplazada y la inoculación de hongos (micorrizas) en la rizósfera de las plantas (BOSSERT y BARTHA 1985, DONNELLY y FLETCHER 1994, LEYVAL y BINET 1998) constituyen formas biológicas de propiciar el retorno del ambiente a su estado original. Asimismo, otros métodos físicos y químicos tienen incidencia directa en la biología del ambiente. En tal sentido, se trata de formas de propiciar en última instancia la biorrestauración ambiental. Por ejemplo, el rompimiento de la compactación del suelo para facilitar el crecimiento de las raíces, la reincorporación de materia orgánica para propiciar el restablecimiento de la microflora, flora y fauna nativa, la quema prescrita y orientada al control de la invasión indeseable de flora exógena o malezas, la construcción de humedales o piscinas de agua fresca que permita recuperar o aumentar

la biodiversidad, la oxigenación de los ambientes acuáticos dulces para estimular la respiración de la fauna y flora marina agotada por la contaminación microbiana, etc., constituyen técnicas empleadas para recuperar el ambiente.

- ¹⁷ Por otro lado, la protección del entorno ecológico por métodos biológicos puede también contribuir a resolver la ecuación de conservación ambiental. En tal sentido, existen varias maneras de favorecer el ambiente; por ejemplo, el control biológico de plagas puede prevenir la ocurrencia de ciertos tipos de contaminación. Así mismo, pueden aplicarse métodos biológicos para mejorar el ambiente, resolviendo así todos los factores de la ecuación ambiental. Por ejemplo, la plantación de leguminosas es capaz de propiciar el enriquecimiento del suelo inclusive por encima de los niveles originales. Por supuesto, existen otras maneras no biológicas de proteger y mejorar el ambiente.
- ¹⁸ Resulta evidente que cualquier proceso de restauración ambiental conlleva inevitablemente a la utilización de técnicas especializadas que permitan descontaminar o destoxificar previo al cumplimiento de los otros factores antes descritos de la ecuación. Ha de entenderse que si el proceso previo de destoxificación no ocurre exitosamente, los otros factores de la ecuación ambiental tienden a cero; es decir, que fracasa la restauración y por ende la conservación ambiental.
- ¹⁹ Por tal razón, es de vital importancia familiarizarse con los procedimientos biológicos, físicos y químicos que se han desarrollado para tales fines. Esto permite tanto el entendimiento de la complejidad de la restauración ambiental como la evaluación de factibilidad. Para estos fines se describen a continuación, en forma muy sucinta, las técnicas más comunes que se emplean en la actualidad, con especial énfasis en las biológicas, dado que resultan las más amigables al ambiente y que ocasionan el menor número de efectos secundarios; asimismo, pueden resultar económicas, más efectivas y de mayor aceptación social.

TÉCNICAS DE DESTOXIFICACIÓN EN RESTAURACIÓN AMBIENTAL

- ²⁰ La lista de tecnologías potenciales que conforman la restauración ambiental resulta dinámica y se encuentra en constante evaluación. Nuevas formas de restaurar surgen con relativa frecuencia tanto en laboratorio como en planta piloto, otras demuestran ser ineficientes en el campo y desaparecen. Sediment Treatment Technologies Database (SEDTEC), Vendor Information System for Innovative Treatment Technologies (VISITT) y Risk Reduction Engineering Laboratory (RREL) Treatability Database representan los tres bancos de datos más reconocidos en la actualidad que indican múltiples experiencias de restauración ambiental, basadas en tecnologías tradicionales y emergentes.
- ²¹ Por otro lado, cuando el ambiente resulta impactado en forma significativa se requiere del empleo de múltiples técnicas de descontaminación o destoxificación a fin de lograr una verdadera restauración del ambiente. Estas incluyen las de naturaleza física, las químicas y las biológicas. Cualquiera de ellas, en forma aislada o en consorcios tecnológicos, busca eliminar, reducir, contener, inmovilizar o desplazar la toxicidad de las zonas impactadas hasta alcanzarse los niveles de restauración deseados.
- ²² Generalmente, los contaminantes son destruidos o convertidos a formas inocuas o menos tóxicas mediante la bioconversión (biorremediación), conversión térmica, tecnologías físicas (extracción, inmovilización, desorción, separación o extracción con solventes) y tecnologías químicas. Adicionalmente, existen técnicas de descontamina-

ción que buscan reducir el volumen o estabilizar el contaminante mediante la fijación a soportes preestablecidos que evitan el lixiviado, la erosión, la volatilización u otros destinos. Tal diversidad de tecnologías dentro del esquema de restauración ambiental es una respuesta a la variedad de factores que influyen en la selección del método, tales como la disponibilidad, viabilidad, costo y otros factores geopolíticos, ambientales y socioculturales.

TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE LOS CONTAMINANTES

TECNOLOGÍAS DE BIORREMEDIACIÓN AMBIENTAL

- ²³ La biorremediación es una tecnología biológica que se inició en la década de los ochenta que consiste en la biotransformación de sustancias contaminantes mediada por microorganismos y plantas, lo cual conlleva al saneamiento ambiental. Tal tecnología depende fundamentalmente del tipo de organismo, de la naturaleza de la sustancia contaminante y de las condiciones geo-químicas en el lugar de impactación. La biodegradación de compuestos contaminantes constituye la base fisiológica de la biorremediación. Esta técnica se aplica al tratamiento de desechos tóxicos y contaminantes que involucra la manipulación del ambiente para favorecer la acción microbiana sobre el compuesto xenobiótico (ALEXANDER 1991, 1994, PRITCHARD y COSTA 1991).
- ²⁴ A pesar de que el efecto nocivo de los contaminantes sobre el ambiente se puede reducir a través de tecnologías convencionales, como la remoción, alteración o aislamiento de compuestos mediante la excavación, incineración o retención, las mismas resultan muy costosas y en la mayoría de los casos no logran destruir el contaminante, sino transferirlo de un ambiente a otro. En contraposición, la biorremediación se sobrepone a tales limitaciones siendo, inclusive, capaz de destruir el contaminante a bajo costo y biorrestaurar el ambiente impactado. Por ello, se está convirtiendo en una tecnología de punta aplicable a la recuperación ambiental (ATLAS y PRAMER 1990).

FACTORES A CONSIDERAR PARA IMPLEMENTAR

LA BIORREMEDIACIÓN

- ²⁵ La utilización de la biorremediación en los procesos de saneamiento ambiental debe tomar en cuenta una serie de condiciones y factores a fin de determinar la factibilidad y eficiencia en la biorrestauración.
- ²⁶ Desde el punto de vista biológico, el ambiente propiamente dicho constituye uno de los factores más importantes. Particularmente, las características fisicoquímicas, microbiológicas y la hidrogeología de la zona impactada por un compuesto contaminante condicionan la biodegradación y por ende, la capacidad de biorrestauración de los microorganismos. Las propiedades del contaminante, como sus características fisicoquímicas y microbiológicas también afectan las posibilidades de aplicar la biorremediación para recuperar la zona afectada.
- ²⁷ Otros factores, como el tiempo de biorrestauración, el costo y la legislación en el saneamiento ambiental resultan de importancia a la hora de pensar en la biorremediación como herramienta para recuperar el ambiente. La biorremediación ofrece una alternativa a mediano y largo plazo que puede alejarse de las expectativas rápidas de una comunidad. Generalmente, el tiempo está influenciado por todos los factores antes mencionados; pero en casi todos los casos puede tardar de meses a años biorrestaurar una zona contaminada. Este tiempo tiende a acortarse en la medida que las técnicas se perfeccionan. Sin embargo, las ventajas comparativas en términos de costo,

efectividad, seguridad ambiental y versatilidad superan los métodos convencionales de saneamiento ambiental. En cuanto a los costos se refiere, se estima una inversión aproximada entre 40 a 150 dólares por metro cúbico de zona impactada tratada, en contraste con otros métodos que pueden alcanzar 1.600 dólares el metro cúbico de tratamiento. Adicionalmente, los otros métodos tienden a trasladar la fuente de contaminación de una zona impactada a otra limpia mientras que la biorremediación tiene el potencial de biotransformar totalmente el compuesto contaminante a formas intermedias o finales inocuas al ambiente y, además, posee la capacidad de poderse implementar en zonas inaccesibles a los otros métodos (ALEXANDER 1991).

- ²⁸ La biorremediación puede ser intrínseca (natural, pasiva o espontánea) cuando se basa en la capacidad innata celular de modificar substratos contaminantes a intermedios menos tóxicos o inclusive inocuos, o dirigida, si se manipulan las condiciones ambientales y/o biológicas mediante la implementación de procedimientos que permitan suplir adecuadamente el sistema (nutrientes, aceptores de electrones y factores de estimulación de crecimiento celular), modificar las condiciones fisicoquímicas de crecimiento (pH, dilución de inhibidores del crecimiento celular, etc.) y aumentar y modificar genéticamente los microorganismos. Para ello, resulta imprescindible conocer a fondo los principios y características metabólicas, fisiológicas y genéticas de los organismos involucrados. Esta tecnología se refiere a una serie de métodos de campo y laboratorio que explotan y mejoran la capacidad de algunas células procariotas (bacterias) y eucariotas (levaduras, hongos filamentosos, protozoarios y plantas) de transformar y/o acumular un compuesto contaminante natural o xenobiótico en forma inocua o menos tóxica. El proceso de transformación o conversión del substrato que subyace a la biorremediación está fundamentado en la biodegradación oxidativa (aeróbica, anaeróbica o fermentativa), reductiva, hidrólisis y cometabolismo, todos ellos orquestados por la actividad enzimática celular y bioacumulación, la cual excluye la actividad enzimática (MADSEN *et al.* 1991, MORGAN y WATKINSON 1992). En la TABLA 1 (PÁG. 1020) se sintetizan los diferentes tipos que se utilizan actualmente.

BIORREMEDIACIÓN EN VENEZUELA Y EL MUNDO

- ²⁹ Dadas las bondades de la biorremediación, ya existen legislaciones de carácter internacional y nacional que contemplan esta metodología como alternativa segura y aceptable para sanear el ambiente. Por ejemplo, la EPA (Environmental Protection Agency), que reúne las legislaciones estatales y federales de los Estados Unidos, reserva a la biorremediación un capítulo muy especial. Estas legislaciones han sido igualmente implementadas en Europa.
- ³⁰ Son innumerables los casos en los que la biorremediación está comenzando a ser aplicada para el saneamiento ambiental, el ejemplo clásico e histórico es el del derrame petrolero Exxon Valdez en Alaska, el más grande ocurrido hasta la presente fecha (PANTAE y VORONEY 1998, PRITCHARD y COSTA 1991), donde la biorremediación mostró su efectividad sobre todos los otros métodos convencionales. Los derrames petroleros, el tratamiento de rellenos sanitarios, los suelos impactados por explosivos militares, la recuperación de aguas subterráneas contaminadas por diversas fuentes, la recuperación de aguas dulces (lagos, ríos, etc.) impactadas por sustancias químicas, provenientes de la actividad industrial, entre otras, constituyen ejemplos de su aplicación a escala mundial (BUROZ 1998, DIBBLE y BARTHA 1979).

- ³¹ Uno de los aspectos más controversiales en la biorremediación es la posibilidad de manipular genéticamente la microflora, para favorecer su capacidad biodegradativa y de resistencia a los contaminantes y condiciones ambientales (DIXON 1996a,b). La obtención de «GMOs», como se le conoce internacionalmente, constituye una técnica muy efectiva; sin embargo, existe la preocupación del impacto que pueda generar, si los plásmidos o los transgenes introducidos por ADN recombinante, para mejorar las cepas biorremediadoras, son transferidos a otros microorganismos con consecuencias adversas e impredecibles. En tal sentido, se ha demostrado experimentalmente la «retención génica»; es decir, un mecanismo que garantiza la muerte de las células recipientes si el gen o genes son transferidos. Timinis *et al.* (1994) en Braunschweig, desarrolló un sistema basado en la colicina el cual asegura que cualquier organismo que reciba tales transgenes son automáticamente destruidos (TIMINIS *et al.* 1994).
- ³² Venezuela, como país petrolero, corre un alto riesgo de contaminación por accidentes y prácticas en todas las fases del manejo de hidrocarburos. Además, también resulta frecuente la contaminación de las aguas subterráneas y cuerpos acuíferos superficiales por la acción irresponsable de las industrias. Sin embargo, existe desde hace menos de 2 años una nueva legislación que contempla la Ley Penal del Ambiente y un decreto que incluye, por primera vez, la biorremediación como alternativa para el saneamiento ambiental. Se trata del decreto extraordinario núm. 2.289 publicado en la *Gaceta Oficial* núm. 5.212 del 12 de febrero de 1998, el cual establece la normativa para el manejo de desechos peligrosos de la actividad de explotación y producción de petróleo y de exploración y explotación de minerales. En especial, la sección II en su artículo 52, contempla «el biotratamiento» como alternativa y en su artículo 53, las condiciones para aplicarlo.
- ³³ Uno de los ejemplos donde la biorremediación se ha utilizado con éxito, en Venezuela, es en el tratamiento de las fosas o lagunas petrolizadas. Se trata de vertederos de desechos peligrosos que se generan durante la exploración, explotación y producción de petróleo, de los cuales hay centenares en el país. Tales fosas representan un peligro potencial no sólo porque contaminan las zonas impactadas e impiden su utilización en cualquier actividad productiva o recreacional, sino que se corre el peligro inminente de contaminar las aguas subterráneas. En tal sentido, dada la existencia de la Ley Penal del Ambiente y de los decretos que obligan al saneamiento ambiental, es justo reconocer que la industria petrolera nacional (PDVSA) y sus filiales han realizado serios esfuerzos y se han sensibilizado hacia los frentes ambientalistas.
- ³⁴ Particularmente, PDVSA ha invertido en investigación básica y aplicada en sus propios laboratorios, en especial INTEVEP, así como contratado los servicios de investigación de universidades nacionales para aplicar la biorremediación. Sin embargo, este esfuerzo puede ser sustancialmente mejorado mediante un programa serio de apoyo a los laboratorios universitarios que actualmente trabajan en el área. En cualquier caso, Venezuela cuenta con experiencias muy positivas en este campo de aplicación, habiendo desarrollado tecnologías de punta a la par o, inclusive, competitivas con la biorremediación de fosas implementada en países desarrollados.
- ³⁵ Actualmente, se comienza la investigación relativa a la aplicación de la biorremediación en el tratamiento de aguas subterráneas y rellenos sanitarios. En este último caso, además de contribuir a biorrestaurar el ambiente, puede desarrollar tecnologías para la recuperación o transformación de desechos en productos de utilidad industrial.

TABLA 1. Tipos de biorremediación.

TIPO DE PROCEDIMIENTO	PRINCIPIO Y TÉCNICA
<i>Procedimientos biológicos</i>	
a) <i>Métodos in situ</i>	
FITORREMIEDIACIÓN	<p>Se basa en la acción de fitoenzimas o enzimas propias de bacterias simbióticas o asociadas a la rizósfera sobre el compuesto xenobiótico. Consiste en la plantación de especies arbóreas capaces de degradar o retener compuestos tóxicos.</p>
LANDFARMING	<p>Fertilización programada del suelo en base a nitrógeno y fósforo según una relación óptima de C:N y C:P, seguido por la mezcla mecánica. Se realiza, generalmente, en forma manual con palas o mediante la ayuda de <i>Pilelowders</i> que homogenizan el suelo y sus constituyentes (incluyendo la microflora y el compuesto contaminante). Se realiza con compuestos a base de desechos orgánicos industriales ricos en nitrógeno y fósforo que sean económicos y fáciles de biodegradar.</p> <p>Como alternativa a la aireación mecánica, se han utilizado soluciones acuosas de peróxido de hidrógeno, el cual libera oxígeno al contacto con el agua; sin embargo, esta técnica ha sido limitada por el costo y el efecto nocivo sobre la microflora (HART 1996, LEYVAL y BINET 1998, MADSEN <i>et al.</i> 1991, PERRY 1979, PRITCHAR y COSTA 1991, POLLARD <i>et al.</i> 1994).</p> <p>La aplicación de <i>Composting</i> es una alternativa, la cual consiste en la aplicación de desechos industriales fáciles de biodegradar y que impidan la compactación de la mezcla. A veces el <i>Composting</i> constituye el propio fertilizante.</p>
BIOPILAS	<p>Amontonamiento en pilones o construcción de cúmulos de tierra contaminada sobre plataformas impermeables (para evitar el lixiviado). Además de muchas de las consideraciones aplicables al <i>Landfarming</i>, requieren suelos húmedos pero sin llegar a mojados o chorreantes.</p> <p>Varían entre 1 a 3 metros de altura y necesitan de la colocación de tierras de contención a los lados para lograr pendientes, rebordes y el acceso. El largo y ancho no pueden sobrepasar los 1,8 a 2,5 metros. Las que están dotadas de sistemas de riego y suministro pueden disponerlos en capas alternantes a lo largo del pilón.</p> <p>Es posible aplicar <i>Composting</i>.</p>

UTILIZACIÓN

VENTAJAS

Procedimientos biológicos

Se utiliza comúnmente en combinación con otras técnicas basadas en la acción microbiana. Por ejemplo, después de haber aplicado un programa intensivo de *Landfarming* con el fin de mejorar y prolongar la biodegradación del compuesto tóxico (BERGER 1990, DIXON 1996a, JERGER *et al.* 1994).

Bajo costo, capacidad regenerativa del lugar impactado y acción prolongada, dado el continuo crecimiento vegetal.

Es la técnica por excelencia empleada en la biorremediación sólida de suelos impactados, particularmente en zonas de gran extensión. Su costo es de bajo a moderado, efectivo y de fácil implementación.

Es útil cuando sólo se requiere una disminución de hasta 95% o por encima de 0,1 ppm y cuando el grado de contaminación no supera los 50.000 ppm para hidrocarburos y 2.500 ppm para metales pesados, dado que se restringe el crecimiento celular. Sin embargo, se requiere de amplias extensiones de tierra (DOUGLAS *et al.* 1994, LEYVAL y BINET 1998).

Es de relativo bajo costo, fácil de implementar y efectivo.

Es útil cuando sólo se requiere una disminución de hasta 95% o por encima de 0,1 ppm y cuando el grado de contaminación no supera los 50.000 ppm para hidrocarburos y 2.500 ppm para metales pesados, dado que se restringe el crecimiento celular. Sin embargo, se requiere de amplias extensiones de tierra (ALEXANDER 1994, HART 1996).

Este sistema resulta económico, simple de diseñar, efectivo para compuestos contaminantes con bajas tasas de biodegradación y adaptable a las condiciones de las zonas y compuestos contaminantes.

Esta técnica es empleada particularmente en el tratamiento de desechos tóxicos que se generan escalonadamente durante la exploración y explotación petrolera, dado que permite la biorremediación secuencial del suelo impactado sin afectar los procesos de biorremediación en curso. También se utiliza cuando el lugar de impactación tiene una distribución heterogénea de contaminantes, lo cual permite un biotratamiento según las necesidades.

TIPO DE PROCEDIMIENTO	PRINCIPIO Y TÉCNICA
<i>Procedimientos biológicos</i>	
<i>a) Métodos in situ</i>	
LECHO PREPARADO	Son sistemas sometidos a <i>Landfarming</i> o «Biopilas» a los cuales se le adaptan mecanismos de drenaje y suministro e inclusive detectores y electrodos de medición para el monitoreo <i>in situ</i> del proceso de biorremediación. Consiste en la conversión del suelo contaminado en un biorreactor natural (STEFANOFF y GARCIA 1995). Es posible complementarse con <i>Composting</i> .
BIORRESTAURACIÓN SUBTERRÁNEA	Constituye una variedad de lecho preparado, donde los sistemas de drenaje, suministro y monitoreo son ubicados en el sub-suelo.
FERTILIZACIÓN EN CUERPOS LÍQUIDOS O ACUÍFEROS ABIERTOS O CERRADOS	En zonas abiertas, como en los ríos y océanos, consiste simplemente en la fertilización. En zonas cerradas, como el caso de lago, o fosas petrolizadas, es posible complementar la fertilización con agitación y aireación mediante sistemas mecánicos. Uno de los grandes problemas es la alta solubilidad de las fuentes de nitrógeno o fósforo que hace que se diluyan fácilmente.
<i>b) Métodos ex situ</i>	
BIOAUMENTACIÓN	Consiste en crecer en biorreactores los microorganismos nativos, exógenos o mejorados genéticamente fuera del lugar de impactación. Una vez que se alcanza la densidad celular deseada, se reinoculan en la zona afectada.
BIOFILTRACIÓN Y FERMENTADORES COMERCIALES	Permite biodegradar compuestos contaminantes (tanto en forma de gas o líquido) mediante la aplicación del xenobiótico a través de filtros cargados con microorganismos como el elemento catalizador o fase descontaminante en lugar de compuestos de retención como el carbono activado. El filtrado, tal vez parcialmente biotransformado, puede ser de nuevo reinyectado hasta su mineralización o pasado a biorreactores.

UTILIZACIÓN

VENTAJAS

Procedimientos biológicos

Pueden implementarse en sistemas cerrados mediante invernaderos, túneles plásticos o simple cubierta de plástico cuando el contaminante contiene fracciones volátiles que se evaporan durante la aireación del suelo antes de biodegradarse. Sin embargo, es de alto costo (JERGER *et al.* 1994, MADSEN *et al.* 1991).

Acelera el proceso de biodegradación. Permite, a su vez, realizar ajustes operativos durante la biorremediación.

Es de difícil implementación y seguimiento. Además, requiere de un amplio conocimiento de la geo-hidrología de la zona impactada. Su costo es de moderado a alto (ALEXANDER 1994, HART 1996, HUESEMANN 1994, JERGER *et al.* 1994, MORGAN y WATKINSON 1992).

Permite el saneamiento de aguas subterráneas y sub-suelo.

Puede constituir la única forma operativa de implementar la biorremediación en océanos y ríos. En espacios cerrados, ha permitido el desarrollo de humedales o piscinas de agua fresca artificiales que favorecen la recuperación y/o aumento de la biodiversidad en forma más controlada. Tales humedales constituyen formas de lechos acuáticos preparados equivalentes a los implementados en zonas terrestres (HART 1996, JERGER *et al.* 1994).

Favorece la biorremediación en zonas impactadas de difícil saneamiento donde no se puede implementar el lecho preparado o someterse a tratamiento *ex situ*. Además de bajo costo comparativo.

La bioaumentación constituye una alternativa para mejorar las técnicas de *Landfarming*, Biopilas, Lecho Preparado, Biorrestauración subterránea y Biorremediación de cuerpos líquidos o acuíferos (ALEXANDER 1994, ATLAS 1993).

Permite disminuir el período de aclimatación por baja densidad celular o por concentraciones inadecuadas de contaminantes (muy altas o muy bajas). Además, es posible incorporar microorganismos exógenos o mejorados cuando los nativos han sido incapaces de biodegradar el compuesto contaminante, aún bajo condiciones de intervención ambiental.

Estas metodologías se encuentran restringidas a compuestos contaminantes de poco volumen pero garantizan un mayor control de las condiciones ambientales y, por ende, se favorece la biodegradación. En tal sentido, se ha propuesto diseñar biorreactores móviles que puedan ser fácilmente transportados de un lugar a otro en campo (ALEXANDER 1994).

Permite la rápida y controlada biodegradación de compuestos contaminantes gaseosos y volátiles. Mejora la eficiencia de la biorremediación y permite aplicarla consecutivamente en distintos lugares, dado el control de las condiciones ambientales.

TIPO DE PROCEDIMIENTO	PRINCIPIO Y TÉCNICA
<i>Procedimientos Físicos</i> (National Research Council 1993)	
CONVERSIÓN TÉRMICA	Las tecnologías de conversión térmica incluyen la incineración, la pirólisis, la oxidación bajo alta presión y la vitrificación. Sin embargo, además del alto costo de las tecnologías destructivas, muchos xenobióticos, como los metales pesados, no son destruidos e inclusive pueden aumentar su capacidad de lixiviación.
DESORCIÓN	Permite la separación física de los compuestos volátiles y semi-volátiles de los sedimentos contaminados a través del calentamiento. El procesamiento térmico de alta y baja temperatura, el sistema x * TRAX, la vaporización/desorción, la aireación térmica de baja temperatura, el procesamiento termal anaeróbico son formas de desorción.
INMOVILIZACIÓN	Mediante este procedimiento, se alteran las características físicas y/o químicas de la zona impactada (suelos y ambientes acuáticos dulces o marinos) por xenobióticos para reducir la liberación del compuesto contaminante una vez que es dispuesto o almacenado. El lixiviado y la pérdida superficial del contaminante pueden ser controlados.
<i>Procedimientos Químicos</i> (National Research Council 1993)	
	El tratamiento químico permite la destrucción de los contaminantes mediante la adición de reactivos añadidos a la zona impactada. A diferencia de la inmovilización, extracción y destrucción térmica, los reactivos químicos destruyen y no simplemente alteran la fase del contaminante. La quelación, dechlorinación, tratamiento de deshalogenización química PEG (polietileno glicol), descontaminación por DeChlor/, dechlorinación por catálisis básica, destoxificación asistida por solventes y ultrasonido, oxidación química, «D-Plus (Sinre/DRAT)» (estimulación enzimática) y la descontaminación bioquímica asistida (la cual combina procesos químicos y biológicos) constituyen ejemplos de tratamiento químico como herramienta en la restauración ambiental.

Consideraciones finales

- ³⁶ La restauración ambiental es una visión amplia del ambiente, más allá de la aplicación de una técnica en particular de destoxificación. Es un enfoque global de nuestro entorno que requiere, por lo tanto, de la participación de técnicos especialistas, políticos y ciudadanos comunes.
- ³⁷ El rescate del ambiente se complementa con la preservación y el mejoramiento del entorno, todos compatibles y no necesariamente excluyentes. Así se llega al establecimiento de una ecuación de conservación ambiental que relaciona los factores intervinientes en el contexto ambiental.
- ³⁸ La biorrestauración se ha convertido en la forma por excelencia de recuperar el ambiente. Puede deducirse que los métodos biológicos y aquellos otros que los favorecen representan la alternativa más integral y amigable al ambiente, dado que reconoce no sólo la contaminación como tal, sino que busca mantener la biodiversidad y mejorar la calidad de vida de todas las especies. Dentro de la biorrestauración, la biorremediación constituye la técnica más avanzada de resolver uno de los factores más importantes en la biorrestauración; es decir, la descontaminación o destoxificación del ambiente. En aquellos casos donde el impacto ambiental no es severo, la biorremediación puede ser conceptualizada como una forma de biorrestaurar. Sin embargo, en los casos de grave impacto ecológico, la biorremediación requiere de otros esfuerzos para lograr el total restablecimiento del ambiente. Tales esfuerzos pueden ser en gran medida de naturaleza biológica, por lo que la biorrestauración se ha constituido en uno de los factores primordiales dentro de la ecuación de conservación ambiental.
- ³⁹ Estas técnicas han sido exitosamente utilizadas en Venezuela y otras partes del mundo. Los resultados son alentadores. Nuestro país puede convertirse en pilar fundamental de la conservación del ambiente a escala mundial, no sólo por las experiencias ya realizadas que permitirían inclusive la transferencia biotecnológica, sino también como custodios del mayor reservorio de biodiversidad en el planeta: la selva amazónica.
- ⁴⁰ En cualquier caso, la conservación del ambiente debe de incluir metas realistas, consonas con la realidad política, social y económica del entorno. En este sentido, además de tomarse en cuenta la realidad local donde se aplique el enfoque ambiental, resulta necesario enriquecerse de las experiencias nacionales e internacionales que permitan no sólo la resolución de un problema ambiental en particular, sino también el rescate del planeta en forma integral. Esto demanda voluntad política y ciudadana, y el desarrollo de nuevas técnicas de saneamiento aplicables al enfoque ambiental moderno.
- ⁴¹ Debe de alertarse, sin embargo, que la restauración ambiental puede ser utilizada política y económicamente con fines distintos al espíritu que le dio origen. A veces, surgen iniciativas destructivas que pretenden restaurar el ambiente impactado. Tanto el desconocimiento del ambiente como los intereses particulares pueden desviar la restauración ambiental y convertirla en una fuente más de impactación.

REFERENCIAS

- ALEXANDER, M. 1991. Research Needs in Bioremediation. *Env. Sci. Technol.* 25:1972-1973.
- ALEXANDER, M. 1994. *Biodegradation and Bioremediation*. Academy press, California, USA.
- ATLAS, R.M. y PRAMER, D. 1990. Focus on bioremediation. *ASM News* 56:7.
- ATLAS, R.M. 1993. Bioaugmentation to enhance microbial bioremediation, en *Biotreatment of industrial and hazardous waste* (eds. M. Gealty M. Levin). pp: 19-37. MacGraw-Hill, New York, USA.
- BERGER, J. (ed.). 1990. *Environmental Restoration. Science and Strategies for Restoring the Earth*. Island Press. Washington, DC. Covelo, California, USA.
- BOSSERT, I. y BARTHA, R. 1985. Plant growth in soils with a history of oil sludge disposal. *Soil Science* 140:75-77.
- BROWN, D. 1986. *Reclamation and revegetation of problem soils and disturbed lands*. Park Ridge, New Jersey, USA. Noyes Data Corporation.
- BUROZ, E. 1998. *La gestión ambiental. Marco de referencia para las evaluaciones de impacto ambiental*. Fundación Polar. pp: 49-117.
- DIBBLE, J. T. y BARTHA, R. 1979. Effects of environmental parameters on the biodegradation of oil sludge. *Appl. Env. Microbiol.* 37:729-739.
- DIXON, B. 1996a. Bioremediation: Can the public accept it? *Animacules* 62:461-462.
- DIXON, B. 1996b. Bioremediation is here to stay. *Animacules* 62:527-528.
- DONNELLY, P.K. y FLETCHER, J.S. 1994. Potential use of mycorrhizal fungi as bioremediation agents, en *Bioremediation through rhizosphere technology* (eds.T.A. Anderson y J.R. Coats), pp: 95-99. Am. Chem. Soc., Washington, DC. USA.
- DOUGLAS, G.S., PRINCE, R.C., BUTLER, E.L. y STEINHAEUER, W.G. 1994. The use of internal chemical indicators in petroleum and refined products to evaluate the extent of biodegradation, en *Hydrocarbons Bioremediation* (eds. R.E. Hinchee, B.C. Alleman, R.E. Hoeppe, R.N. Miller). Lewis Publishers, Boca Ratón, USA.
- FRANHEIN, G. 1975. Bioremediation Round table meeting on indicators of the quality of life, en *Calidad de vida y necesidades humanas* (ed. G. Gallopin). Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables, Sistemas Ambientales Venezolanos, Serie 1, Documento 2, Proyecto VEN-79-001, Caracas.
 - HART, S. 1996. *In Situ Bioremediation: Defining the limits*. *Env. Sci. Technol.* 30:398-401.
- HUESEMANN, M.H. 1994. Guidelines for land-treating petroleum hydrocarbon-contaminated soils. *J. Soil Contamination* 3:299-318.
- JERGER, F.D.E., WOODHULL, P.M., FLLATHMAN, P.E. y EXNER, J.H. 1994. Solid-phase bioremediation of petroleum hydrocarbons-contaminated soil: laboratory treatability study through site closure, en *Bioremediation: Field Experience* (eds. R.E. Hinchee, B.C. Alleman, R.E. Hoeppe, R.N. Miller), pp: 177-193. Lewis Publishers. USA.
 - LEYVAL, C. y BINET, P. 1998. Effect of polyaromatic hydrocarbons in soil on arbuscular mycorrhizal plants. *J. Environ. Qual.* 27:402-407.
 - MADSEN, E., SINCLAIR, J. y GHIORSE, W. 1991. *In situ* biodegradation: Microbiological patterns in a contaminated aquifer. *Science* 252:830-833.
- MORGAN, P., WATKINSON, R. 1992. Factors limiting the supply and efficiency of nutrient and oxygen supplement for the *in situ* biotreatment of contaminated soil and groundwater. *Water Res.* 26:73-78.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL. 1993. *In situ Bioremediation: When does it work?* National Academy Press, Washington, DC. USA.

- PANTAE, A.F. y VORONEY, R.P. 1998. Biodegradation and Bioremediation. *J. Environ. Qual.* 27:395-402.
- PERRY, J.J. 1979. Microbial cooxidation involving hydrocarbons. *Microbiol. Rev.* 43:59-72.
- POLLARD, S.J., HRUDEY, S.E. y FEDORAK, P.M. 1994. Bioremediation of petroleum and creosote contaminated soils: a review of constrains. *Was. Manag. Res.* 12:173-194.
- PRITCHARD, P.H. y COSTA, C.F. 1991. EPA's Alaska oil spill bioremediation project. *Environ. Sci. Technol.* 25:372-378.
- STEFANOFF, J.G. y GARCIA, M.B. 1995. Physical conditioning to enhance bioremediation of excavated hydrocarbon contaminated soil at McClellan Air Force Base. *Environ. Progress* 14:104-110.
- TIMINIS, K.N., STEFFAN, R. J. y UNTERMAN, R. 1994. Designing Microorganisms for the treatment of toxic waste. *Ann. Rev. Microbiol.* 48:525-557.
- WALTER, M.V. y CRAWFORD, R.L. 1997. Biotransformation and Biodegradation, en *Manual of Environmental Microbiology* (eds. C.J. Hurst, G.R. Knudsen, M.J. Mcnerney, L.D. Stetzenbach, M.V. Walter), pp: 707-708. asm Press, Washington, DC. USA.