

# Remediación y restauración

## 6

Hemos discutido en los capítulos previos las alternativas y herramientas disponibles para evaluar la integridad ecológica de los ríos. Una vez completado el proceso de evaluación de las características hidrográficas y topográficas del río y su calidad de agua, incluyendo la identificación de los agentes contaminantes físicos, químicos y microbiológicos, y la condición biológica del ecosistema, y determinado las potenciales fuentes de emisión de contaminantes, es posible diagnosticar el estado del cuerpo de agua.

La siguiente pregunta que se nos plantea es:

**¿Cómo remover los contaminantes presentes y qué estrategias seguir para restaurar el ecosistema?**

En este capítulo, intentaremos responder mediante algunos conceptos básicos a esas preguntas.

Se denomina *remediación* al procedimiento utilizado para remover o contener un derrame tóxico o de materiales peligrosos producidos en un sitio determinado, como resultado de la actividad humana (U.S.EPA, 2008). Involucra el desarrollo y aplicación de una o más estrategias cuidadosamente planificadas dirigidas a la remoción, destrucción, contención o reducción de la disponibilidad de contaminantes para los organismos vivos expuestos (CCME, 1997). El alcance de los procesos de remediación es, entonces, más amplios que la simple limpieza o remoción de contaminantes presentes.

Se entiende por *restauración ambiental* a las medidas y estrategias tomadas para recuperar la estructura y función de un ecosistema degradado, incluyendo su hidrología, paisaje y comunidades biológicas, o porciones de ellas, a una condición ecológica de menor deterioro (Organisation for Economic Co-operation and Development, 2007). U.S. EPA (2003) define el término como la recuperación de un ecosistema degradado a un estado aproximadamente cercano a su potencial natural persistente en el tiempo. Si la restauración incluye el retorno al sistema natural original, se asume que los atributos ecológicos del sistema original son conocidos, lo que ocurre en escasas oportunidades. Por consiguiente, existen distintas interpretaciones del éxito de un proceso de restauración particular (Livingston, 2006). Más adelante, discutiremos más ampliamente estos conceptos.



# Remediación de aguas superficiales y sedimentos

6.1

En respuesta a la creciente necesidad de enfrentar los problemas asociados a la presencia de contaminantes en el ambiente, se han desarrollado numerosas tecnologías de remediación para tratar suelos, sedimentos, aguas subterráneas, lixiviados y aguas superficiales. Anualmente, en todo el mundo, se proponen y evalúan a escala piloto nuevas metodologías, desarrolladas por la comunidad científico-tecnológica, tendientes a resolver la problemática asociada a la remediación de los sitios contaminados.

La mayor parte de la experiencia en esta área del conocimiento se ha centrado en la remediación de suelos y aguas subterráneas. La información respecto de la aplicación de tecnologías sobre ecosistemas dulceacuícolas naturales, tales como ríos, arroyos y *humedales* es relativamente escasa. Probablemente, esto se deba a la complejidad de la problemática a resolver en estos casos, ya que estos proyectos implican la aplicación simultánea de distintas tecnologías de remediación sobre las aguas superficiales, los sedimentos y el suelo y el paisaje ribereño.

Los procesos de remediación de ecosistemas dulceacuícolas naturales a gran escala que se están actualmente desarrollando a lo largo del mundo, tales como los de los ríos Savannah, Fox y Hunter, en Estados Unidos de Norteamérica, y los ríos Leichhardt, King y Parramatta, en Australia, citando sólo algunos ejemplos, han implicado esfuerzos conjuntos de la sociedad humana involucrada, las organizaciones gubernamentales locales, regionales y nacionales, y los responsables de las actividades productivas asentadas en la zona para acordar las estrategias a utilizar y el aporte de los recursos económicos y técnicos necesarios. Estos proyectos han requerido periodos prolongados de evaluaciones previas y extensas negociaciones tendientes a acordar los objetivos de la remediación y las tecnologías a aplicar. Finalmente, generalmente, estos proyectos han previsto que los procesos de remediación en sí mismos se extenderían durante tiempos variables entre 6 y 15 años antes de alcanzar los resultados esperados.

El *sitio de remediación* es definido como el área discreta o el volumen de espacio que ha sido contaminado por un tipo de actividad, y donde se planea aplicar o se aplican estrategias de remediación. El sitio puede ser muy amplio, incluyendo varios cientos de hectáreas, o muy pequeño, por ejemplo, de apenas 10 m<sup>2</sup>. Sus características dependerán del tipo de actividad humana que ha causado la contaminación (Suthersan, 1999).

En el caso de los ecosistemas dulceacuícolas, el sitio de remediación puede incluir suelo ribereño, agua superficial, sedimentos, y aún, agua subterránea contaminados,



En consecuencia, el proceso de remediación de un sitio contaminado incluye los procedimientos de:

- ❖ Evaluación del sitio
- ❖ Selección de la o las tecnologías adecuadas para la remediación
- ❖ Reparación, confinamiento, reducción o remoción del / los contaminantes detectados, esto es, la remediación propiamente dicha (U.S.EPA, 2005).

U.S. EPA (2005) distingue, de acuerdo a su grado de desarrollo y nivel de experiencia en su aplicación, tres tipos de tecnologías de remediación, a saber:

- ❖ Tecnología Emergente: es una nueva tecnología, recientemente desarrollada, que actualmente se encuentra en etapa de ensayo a escala de laboratorio
- ❖ Tecnología Innovadora: es una tecnología que se ha probado en el campo y se ha aplicado a sitios contaminados, pero que no cuenta con un largo historial de utilización. En consecuencia, la información sobre su costo y eficiencia puede resultar insuficiente como para predecir su resultado en distintas condiciones operativas
- ❖ Tecnología Establecida: es una tecnología para la cual puede hallarse fácilmente información sobre costos y eficiencia; ha sido utilizada en numerosos sitios diferentes y sus resultados han sido documentados en forma completa.

La mayoría de las tecnologías de remediación están dirigidas a alguno de los siguientes tres objetivos primarios:

- ❖ Destruir los contaminantes o alterar su estructura química de manera que no resulten tóxicos para la biota expuesta
- ❖ Extraer o separar los contaminantes del sitio, de manera de transportarlos para su tratamiento posterior o disponerlos en un sitio seguro, o
- ❖ Inmovilizar los contaminantes, evitando su dispersión en el ambiente, hasta tanto se decida alguna alternativa de tratamiento o, en caso de que ésta no exista, se desarrolle otra alternativa adecuada.

timientos ambientales involucrados y los contaminantes presentes, surge claramente la necesidad de realizar una evaluación exhaustiva del sitio previamente a la toma de decisiones del alcance de la remediación y el tipo de tecnologías a aplicar.

La evaluación del sitio contaminado incluye su caracterización geológica y físico-química, determinación del rango y diversidad de contaminantes, mediante muestreos exhaustivos y determinaciones físico-químicas adecuadas, y la valoración completa de la ubicación de los contaminantes presentes, tanto vertical como horizontalmente.

Se han desarrollado numerosas tecnologías de remediación para tratar suelos, sedimentos, aguas subterráneas y superficiales contaminadas, incluyendo métodos "*in situ*" y "*ex situ*". Los primeros se aplican directamente en el sitio de remediación, sin remover el medio contaminado. Los métodos "*ex situ*" implican la remoción del medio contaminado y su transporte hasta la instalación donde se le aplica la o las tecnologías seleccionadas.

La principal ventaja de los tratamientos *in situ* es que permiten que el agua superficial

incluyendo áreas muy extensas.

Para cada sitio de remediación debe considerarse, además, la *madurez* o el *estado de progresión* de la contaminación. Así, un sitio contaminado puede presentar diferentes características dependiendo del tiempo transcurrido desde el inicio del proceso de contaminación y de la velocidad y la dirección de dispersión y *advección* de los contaminantes desde su fuente. Es importante comprender, teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, en consecuencia, que cada sitio contaminado es diferente y que, en consecuencia, cada proyecto de remediación es diferente e implica una solución única. Así, las tecnologías y procedimientos aplicados para un sitio de contaminación pueden ser no ser adecuados y, más aún, resultar ineficientes para otro sitio contaminado similar (Suthersan, 1999)

Un sitio contaminado particular puede requerir la aplicación de una combinación de procedimientos para permitir la remediación óptima de acuerdo a sus características. Así, pueden utilizarse tecnologías biológicas, físicas y químicas en conjunto para reducir la contaminación a un nivel aceptable y seguro (Suthersan, 1999).

Dada la variabilidad en cuanto a las dimensiones y características geográficas, físicas y químicas del sitio contaminado, los compar-

y los sedimentos sean tratados en el sitio, resultando en una disminución de los costos y de los riesgos asociados a la manipulación y transporte de materiales contaminados, y determinando una menor alteración del ambiente sometido a la remediación. Estos tratamientos, sin embargo, generalmente requieren un prolongado tiempo de aplicación y resulta más difícil verificar la eficacia y uniformidad del proceso de remediación, debido a la natural variabilidad de los ambientes donde son aplicados (Suthersan, 1999).

Los tratamientos *ex situ* requieren usualmente un menor tiempo de aplicación que las tecnologías *in situ* y resulta más sencillo evaluar la uniformidad del tratamiento, dado que el medio es separado, homogenizado y tratado separadamente. Sin embargo, los tratamientos *ex situ* implican la excavación de los sedimentos y/o la extracción del agua superficial, determinando mayores costos de implementación, la utilización de equipamiento más complejo, mayor riesgo de manipulación y transporte de materiales contaminados. Por otra parte, determinan una alteración significativa del ambiente sometido a la remediación, mientras el proceso se desarrolla (Suthersan, 1999).

La **selección** de las tecnologías de remediación a aplicar dependerá de las características geológicas y físico-químicas del sitio a remediar, de los compartimientos ambientales involucrados, tales como agua superficial, sedimentos, etc., del tipo y concentración de contaminantes presentes, de los requerimientos establecidos por las normativas locales y regionales, de los costos asociados al proceso de remediación, tanto en personal como en insumos, y de las limitaciones existentes en cuanto al tiempo requerido para la obtención de resultados.

Las **tecnologías de tratamiento destructivas**, capaces de alterar la estructura química de los contaminantes, pueden ser aplicadas *in situ* o *ex situ* e incluyen métodos de tratamiento térmico, biológico, o químico.

Las **tecnologías de tratamiento por extracción y separación** de contaminantes incluyen procesos de separación térmica, extracción con vapor de agua, solventes, agua pura o aditivada con solventes de distinto tipo, o aire, separación de fases de distinta densidad, intercambio iónico y combinaciones de los métodos anteriores.

Las **tecnologías de inmovilización** no son efectivas en forma permanente, están diseñadas para ser utilizadas durante un cierto tiempo, hasta decidir otra alternativa destructiva o de extracción posible. Incluyen métodos de estabilización, utilizados para metales y otras sustancias químicas inorgánicas, solidificación y confinamiento, tales como los rellenos sanitarios seguros y las barreras de contención (U.S. EPA, 2005).

Nos referiremos brevemente a las tecnologías de remediación biológicas y físico-químicas más comúnmente utilizadas en los ecosistemas dulceacuícolas, tanto para aguas superficiales como para sedimentos.



# Tecnologías de remediación biológicas “in situ” y “ex situ”

## 6.1.1

Los tratamientos biológicos *in situ* y *ex situ* implican la intervención de la biota naturalmente presente en el sitio de remediación o implantada allí por el hombre con el fin de remover los contaminantes presentes. Todas ellas implican la degradación de los contaminantes presentes en el medio, por lo menos, en forma parcial, por lo que constituyen tecnologías destructivas.

Dentro de los tratamientos biológicos *in situ* habitualmente aplicados a aguas superficiales y sedimentos contaminados se cuentan:

- ❖ *Biorremediación incrementada* o *biodegradación incrementada*;
- ❖ *Atenuación natural monitoreada* y
- ❖ *Fitorremediación*.

La *biorremediación incrementada*, también denominada *biodegradación incrementada*, es una tecnología aplicable *in situ* dirigida hacia la generación de un ambiente favorable para los microorganismos, tanto en lo que se refiere a la provisión de oxígeno como la disponibilidad de nutrientes, de manera de estimular el crecimiento de la comunidad microbiológica y de favorecer la utilización de los contaminantes como fuente de carbono y de energía para su actividad metabólica. Los microorganismos involucrados en el proceso pueden ser bacterias aeróbicas, anaeróbicas, facultativas, u hongos (FIGURA 40).

En el caso de los ríos y arroyos contaminados, generalmente, la aplicación de esta tecnología implica asegurar la provisión de alguna combinación de oxígeno y nutrientes, disponibles para el sistema, y monitorear adecuadamente la temperatura y el pH del medio. En los cursos de agua de pequeño a mediano caudal, el oxígeno y los nutrientes son usualmente provistos a través de cañerías flexibles, perforadas a intervalos regulares, ubicadas a través del cauce, apoyadas sobre el sedimento del fondo. El sistema de cañerías está conectado a bombas de diseño adecuado que aseguran el bombeo controlado de aire o agua rica en oxígeno y nutrientes hacia el río u arroyo. En el caso de ríos de elevado caudal, suelen utilizarse embarcaciones apropiadas, en las que se disponen sistemas de bombeo de aire y nutrientes. Estas embarcaciones se trasladan a través del sitio contaminado liberando oxígeno y nutrientes, en la medida en que sea requerido. Esta última tecnología es utilizada exitosamente, desde hace más de veinte años, en la remediación del río Támesis, en Inglaterra.

Adicionalmente, tanto en los pequeños cursos de agua como en los grandes ríos, se disponen sistemas automáticos o manuales de determinación de variables ambientales, tales como concentración de oxígeno disuelto, concentración de nutrientes, pH, conductividad, temperatura, que permiten mantener un apropiado control del proceso.

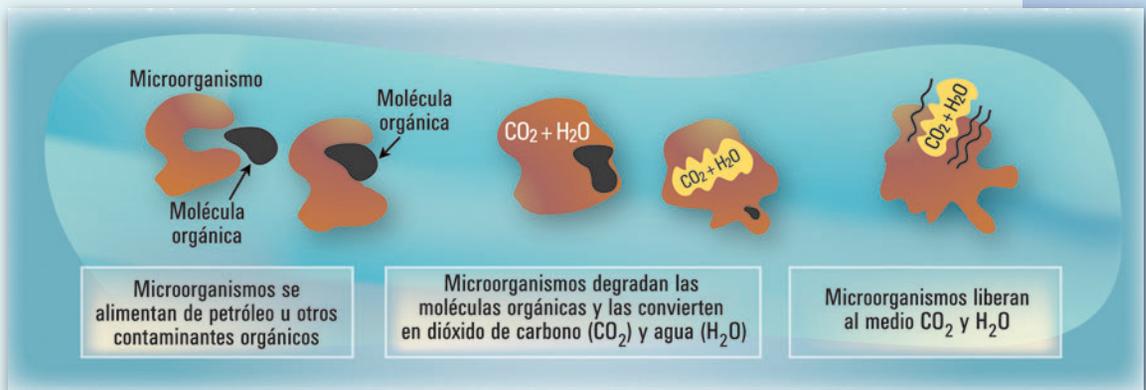
Este tipo de tratamiento puede ser aplicado, en consecuencia, en aquellos casos en que los contaminantes presentes sean biodegradables. No es una tecnología aplicable al tratamiento

de contaminantes inorgánicos (U.S. Army Environmental Center, 2007).

La biorremediación *in situ* ha sido utilizada exitosamente en el tratamiento de sedimentos y aguas superficiales contaminados con una amplia diversidad de compuestos orgánicos, incluyendo hidrocarburos, solventes orgánicos y plaguicidas, entre otros...

En términos generales, se trata de una tecnología de bajo costo de implementación. Los contaminantes son destruidos y, generalmente, no se requiere la aplicación de tratamientos posteriores que completen el proceso.

Un aspecto a considerar en la aplicación de esta metodología es que, en ocasiones, el proceso de biodegradación puede generar subproductos más tóxicos que el original; tal es el caso de la degradación del tricloroetileno (*TCE*), un solvente clorado volátil, que genera cloruro de vinilo, altamente tóxico. En consecuencia, la implementación de esta tecnología implica disponer de un exhaustivo conocimiento de las reacciones metabólicas involucradas y de una evaluación previa de la necesidad de aplicar metodologías adicionales que controlen y eviten la exposición de la biota acuática a los productos secundarios de la degradación.



**Figura 40:** Diagrama esquemático de la degradación aeróbica en agua y sedimentos (Modificado de U.S. EPA, 2001b)

En algunos casos, a fin de mejorar el proceso, puede requerirse la adición de microorganismos adaptados para la degradación de contaminantes específicos o capaces de sobrevivir bajo condiciones ambientales extremas. Este procedimiento es denominado *bioaugmentación*. A tal fin, se recolectan microorganismos nativos, naturalmente presentes en el sitio de remediación, y se los cultiva separadamente. Según lo que se requiera, se desarrolla un proceso de selección de aquellos que son capaces de degradar determinados compuestos orgánicos o de sobrevivir en condiciones ambientales específicas. Finalmente, estos cultivos enriquecidos son reinoculados en el sitio como estrategia para incrementar rápidamente la densidad de la comunidad microbiana. Investigaciones recientes no han encontrado evidencia de beneficios significativos resultantes de la adición de microorganismos no nativos (U.S. Army Environmental Center, 2007)...

Algunos compuestos orgánicos no pueden ser utilizados como fuente de energía y de carbono por los microorganismos habitualmente presentes en los ecosistemas dulceacuícolas, tal es el caso de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs). Sin embargo,

pueden ser biodegradados mediante *procesos cometabólicos*. El *cometabolismo* es definido como la transformación de un compuesto orgánico por un microorganismo, sin que éste sea utilizado como fuente de energía o de carbono. La sustancia orgánica es degradada a través de un camino metabólico secundario y el organismo no recibe beneficios, en términos energéticos, a partir de ese proceso. Estos procesos cometabólicos de degradación

La aplicación de la biorremediación incrementada requiere:

- ❖ El modelado y la evaluación previa de las tasas y vías de degradación de contaminantes
- ❖ La predicción de la concentración de contaminantes esperada aguas debajo de la fuente y en los potenciales receptores, a fin de demostrar que los procesos naturales de degradación reducirán efectivamente la concentración de contaminantes por debajo de los niveles que impliquen un riesgo inaceptable para la biota que potencialmente podría resultar expuesta.
- ❖ El monitoreo a largo plazo dirigido a confirmar la existencia de procesos de degradación consistentes con los objetivos previstos de remediación.

resultan ser más lentos y, para asegurar su producción *in situ*, se requiere asegurar la disponibilidad de fuentes de carbono y energía adecuadas para los microorganismos involucrados. A tal fin, suelen inyectarse en el medio soluciones diluidas de otros compuestos orgánicos que puedan ser usados como fuentes de carbono y energía por los microorganismos presentes, tales como metano, metanol, tolueno, propano y butano (Suthersan, 1999).

La biorremediación incrementada es una tecnología de aplicación a largo plazo; el proceso de remediación puede durar desde 6 meses a 5 años, dependiendo de las tasas de degradación de los contaminantes específicos, las características del sitio y las condiciones climáticas. Las bajas temperaturas ambientales reducen la efectividad del proceso.

La *atenuación natural monitoreada* no constituye una tecnología de remediación en sí misma. Implica el cuidadoso control y monitoreo de los procesos de reducción natural de la concentración de contaminantes, debida a los procesos de transporte y degradación en el sitio producidos sin intervención humana, hasta alcanzar los objetivos de remediación previstos, específicos para el sitio, dentro de un tiempo razonable. En resumen, implica la observación y monitoreo de los procesos de remediación que se producen naturalmente en el sitio contaminado. Es denominada, también, como *remediación intrínseca*, *biorremediación intrínseca*, *restauración natural* o *biorremediación pasiva*. Puede ser percibida como una alternativa de “no acción”, sin embargo, no lo es (U.S. Army Environmental Center, 2007).

Resulta posible aplicar esta tecnología cuando los contaminantes presentes son biodegradables y su destrucción se está llevando a cabo, efectivamente, por biodegradación, cuando la biota no ha sido aún expuesta a los contaminantes presentes y cuando existe un bajo nivel de riesgo o no existe riesgo significativo debido a la presencia de contaminantes en el sitio. En consecuencia, esta estrategia puede ser aplicada cuando existen bajos niveles de contaminación orgánica en el sitio. No se recomienda su aplicación cuando los contaminantes presentes pueden migrar y dispersarse en el ambiente, antes de ser degradados.

La atenuación natural monitoreada ha sido aplicada exitosamente a ambientes dulceacuícolas contaminados con compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles halogenados, hidrocarburos y plaguicidas organofosforados.

Esta estrategia presenta la ventaja de ser una práctica de bajo costo, que no genera alteraciones del paisaje y que puede ser usada posteriormente a la aplicación de otras tecno-

logías más intrusivas. Sin embargo, requiere un largo tiempo de aplicación y la realización de monitoreos a largo plazo. Su aplicación depende de que no se produzcan cambios naturales o de origen antropogénico en las condiciones hidrogeológicas locales, que puedan alterar adversamente los resultados previstos. Por otra parte, la comunidad humana involucrada puede asociar la aplicación de esta tecnología a la ausencia de acciones dirigidas hacia la solución de la problemática ambiental planteada, requiriéndose, en consecuencia, esfuerzos adicionales para asegurar su aceptación.

La **fitorremediación** es un término genérico aplicado a un grupo de tecnologías que utilizan plantas para remover, transferir, estabilizar y destruir contaminantes orgánicos e inorgánicos en suelo, agua y sedimentos, a través de los procesos biológicos, químicos y físicos naturales de esos organismos.

Las plantas poseen excepcionales capacidades metabólicas y de absorción, y sistemas de transporte que les permiten capturar selectivamente nutrientes y contaminantes a partir del suelo y el agua. La fitorremediación involucra el crecimiento de plantas en un medio contaminado, durante un periodo determinado, para remover los contaminantes o facilitar su inmovilización y/o degradación. Posteriormente, las plantas pueden ser cosechadas, procesadas y dispuestas en un sitio adecuado, de manera que los contaminantes no resulten nuevamente liberados al medio.

La fitorremediación es una tecnología pasiva, ya que sólo requiere la utilización de la energía solar, disponible para la remediación de sitios con bajos a moderados niveles de contaminación. Ha sido usada exitosamente para la remoción de metales, solventes orgánicos, explosivos, petróleo, hidrocarburos aromáticos, entre otros contaminantes. Ha sido empleada, además, para el manejo de cuencas a través del control hidráulico de los contaminantes, controlando su dispersión. Es un proceso de tratamiento lento, a largo plazo, requiriendo entre 3 y 5 años o más de aplicación, dependiendo de la tasa de crecimiento de las plantas seleccionadas y de las condiciones del medio (U.S. Army Environmental Center, 2007).

Esta tecnología ha sido empleada, generalmente, en proyectos de pequeña y mediana escala. Existe una limitada información respecto

Existen distintos mecanismos a través de los cuales las plantas remueven, degradan y contienen contaminantes. En el caso de la remediación de aguas superficiales y sedimentos, los mecanismos más comúnmente involucrados son:

- ❖ Biodegradación incrementada por rizósfera: se produce en el suelo inmediatamente adyacente a las raíces de la planta; las sustancias naturales producidas y liberadas por las raíces de las plantas aportan nutrientes a la microflora del suelo, incrementando su actividad biológica y, en consecuencia, la biodegradación de los compuestos contaminantes presentes
- ❖ Control fitohidráulico: el sistema de raíces de la planta permite contener la migración e infiltración de contaminantes, creando una barrera hidráulica natural
- ❖ Fitoextracción o fitoacumulación: las raíces de las plantas capturan contaminantes que son transportados y acumulados en otros tejidos vegetales vivos, tal como hojas y brotes, donde las sustancias químicas permanecen retenidas; es el proceso que prevalece en el caso de la remediación de metales y radionucleidos
- ❖ Fitodegradación: es el proceso que involucra la extracción de contaminantes a través del sistema de raíces y su posterior degradación, mediante los procesos metabólicos de la planta; ciertas enzimas vegetales, como las dehalogenasas y oxigenasas, catalizan los procesos de degradación de solventes orgánicos, plaguicidas y herbicidas, hidrocarburos y sustancias orgánicas cloradas
- ❖ Fitoestabilización: las raíces de las plantas producen compuestos químicos que, una vez liberados al medio, inmovilizan a los contaminantes presentes en la interfase entre las raíces y el sedimento; algunas plantas absorben, acumulan e inmovilizan contaminantes inorgánicos dentro de sus raíces, donde permanecen retenidos; y
- ❖ Fitovolatilización: a través del sistema de raíces de las plantas se extraen y transportan contaminantes orgánicos desde el agua y el sedimento hacia las hojas, donde son eliminados a la atmósfera por transpiración, evaporación o volatilización.

de sitios de remediación extensos. Los avances en técnicas biológicas y químicas determinan que la fitorremediación presente un alto potencial para servir como un método de remediación sustentable y ecológicamente aceptable.

En los sitios de aplicación de esta tecnología, existe un riesgo considerable de que los animales presentes en el medio consuman el material vegetal con alta concentración de contaminantes, determinando su reintroducción en la cadena trófica. A fin de evitar esta posibilidad, en los sitios de fitorremediación se restringe el acceso de animales de pastoreo, aves y peces mediante alambrados, redes de cobertura y redes acuáticas, se aplican plaguicidas para eliminar roedores e insectos, y se implementa la cosecha de las plantas antes de su floración o producción de semillas, limitando la disponibilidad de alimento para otras especies.

Las plantas habitualmente seleccionadas para la fitorremediación de ecosistemas dulceacuícolas incluyen macrófitas, tales como las totoras (*Typha dominguensis*), papiros (*Cyperus* spp.), camalotes o jacintos de agua (*Eichhornia* spp.), redondita de agua (*Hydrocotyle ranunculoides*), lentejas de agua (*Lemna gibba* y *Spirodela intermedia*), lechuga de agua (*Pistia stratiotes*) y espinacas de agua (*Ipomoea* spp.), entre otras especies (U.S. Army Environmental Center, 2007).

Se han llevado a cabo experiencias exitosas utilizando estrategias de fitorremediación en la construcción de corredores ribereños. Las plantas son aplicadas a lo largo de la margen del río, de manera de controlar, interceptar y remediar la contaminación, sobre todo asociada a la presencia de metales, antes de que se produzca su ingreso al río.

Las tecnologías de fitorremediación presentan la ventaja de estar basadas en procesos naturales y requerir escaso equipamiento y una sencilla operación. Por otra parte, la presencia de plantas determina que el paisaje en el sitio de remediación resulte más atractivo.

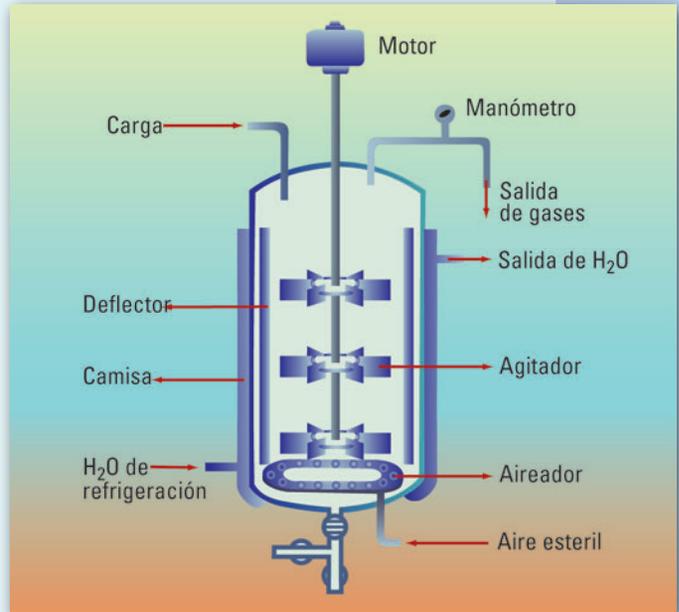
Las tecnologías de remediación biológicas *ex situ* habitualmente utilizadas implican la extracción previa del agua y/o de los sedimentos para ser transportados hacia una instalación, externa al sitio, donde serán tratados. Incluyen, entre otras, las metodologías de:

- ❖ *Biorreactores*,
- ❖ *Humedales artificiales*,
- ❖ *Biopilas*,
- ❖ *Compostaje*, y
- ❖ *Tratamiento en tierra por labranza* o “*landfarming*”.

Los *biorreactores* son, como su nombre lo indica, reactores biológicos integrados por un recipiente apropiado que mantiene un ambiente interno apropiado, aportando todos los requerimientos necesarios para mantener una comunidad de microorganismos degradadores, incluyendo el ingreso del material a degradar, su mezclado, el control de la temperatura, el suministro de oxígeno y nutrientes, el control del pH, el egreso del material tratado, la eliminación de gases y productos residuales, etc. (FIGURA 41). Suelen tener forma cilíndrica, con tamaño variable y están usualmente recubiertos por una carcasa metálica.

Los microorganismos pueden estar suspendidos libremente en el medio, mantenidos

mediante agitación continua, o asociados, formando una delgada película fija, a un material sólido, inerte, de soporte contenido en el biorreactor. Así, se diseñan *biorreactores de crecimiento en suspensión*, en el primer caso, y de *crecimiento en fijación*, en el segundo. El proceso de biodegradación que se lleva a cabo en estas instalaciones puede ser aeróbico, facultativo o anaeróbico. En el caso del tratamiento de aguas superficiales se utilizan predominantemente biorreactores aeróbicos. El tipo de metabolismo de la comunidad de microorganismos contenida en el sistema y el volumen y características del material a tratar determinan los parámetros y características de diseño y operación del biorreactor.



**Figura 41:** Diagrama esquemático de un biorreactor de mezcla continua (Modificado de Tchobanoglous y colaboradores, 2003.)

El agua superficial extraída del sitio contaminado es puesta en contacto con los microorganismos suspendidos o fijados en el biorreactor. La materia orgánica presente en el agua es degradada por la comunidad biológica activa produciendo  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  y nueva biomasa bacteriana. La comunidad microbiana puede ser obtenida a partir del mismo cuerpo de agua contaminado o a partir de un inóculo de microorganismos adaptados para la degradación de contaminantes específicos. El agua ya tratada puede ser retornada al cuerpo de agua o ser utilizada para otros fines, tales como irrigación, potabilización, etc.

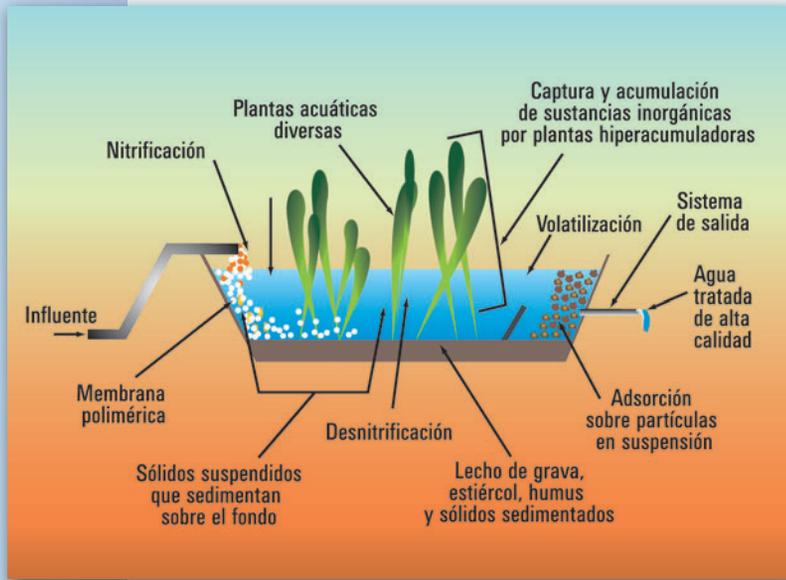
Esta tecnología implica su utilización a largo plazo, durante varios años, hasta obtener los resultados deseados.

Los biorreactores han sido utilizados exitosamente para tratar aguas contaminadas con compuestos orgánicos semivolátiles, hidrocarburos, PCBs y otros compuestos biodegradables. El proceso ha mostrado ser menos efectivo para la degradación de plaguicidas.

La tecnología de *humedales artificiales* utiliza los procesos geoquímicos y biológicos naturales generados en un ecosistema de *humedal* construido por el hombre, para acumular y remover compuestos orgánicos e inorgánicos contaminantes presentes en el agua que ingresa en él. La tecnología incorpora los principales componentes de un humedal natural, incluyendo suelos con alto contenido orgánico, presencia de una comunidad microbiológica activa, algas y plantas vasculares. La actividad microbiológica es la principal responsable de la degradación de la materia orgánica presente en el agua que ingresa al sistema (*influyente*).

El *influyente*, proveniente del bombeo de las aguas superficiales de un río u arroyo contaminado fluye a través de las distintas zonas aeróbicas, anaeróbicas y anóxicas del humedal artificial, en las que se generan diferentes procesos de degradación.

Los humedales son construidos sobre un lecho de grava, paja o estiércol, dispuesto sobre



**Figura 42:** Diagrama esquemático de un humedal artificial, mostrando los principales procesos de degradación y transformación de los contaminantes producidos en él (Modificado de U.S. EPA – USAF, 2007).

una membrana polimérica impermeable, que evita el escurrimiento y lixiviación de los materiales presentes fuera de los límites del humedal (FIGURA 42).

Su diseño intenta reproducir la biodiversidad presente en una zona húmeda natural. Así, se siembran plantas acuáticas enraizadas y flotantes, y plantas vasculares enraizadas en las orillas, autóctonas o foráneas, tales como cañas (*Phragmites* spp.), totoras (*Typha* spp. y *Scirpus* spp.), lirios de agua (*Iris* spp.), nenúfares (*Nymphaea* spp.), juncos (*Juncus* spp.), juncias (*Carex* spp.), plátanos de agua (*Alisma* spp.), milhojas de agua (*Myriophyllum* spp. y

*Ceratophyllum* spp.), junco florido (*Butomus* spp.), espigas de agua (*Potamogeton* spp.), entre otras. En el caso de contaminación por metales y metaloides, es crucial la siembra de plantas hiperacumuladoras de metales. La comunidad microbiana aeróbica y anaeróbica degradadora presente en el sedimento y en suspensión en el agua genera la degradación aeróbica y anaeróbica de los compuestos orgánicos presentes en el influente, la desnitrificación anaeróbica y la remoción biológica de fósforo.

Así, los compuestos orgánicos son degradados predominantemente por actividad microbiológica. Los metales y metaloides son removidos por procesos complejos de intercambio iónico, debido al contacto con sustancias húmicas, compuestos orgánicos del sedimento y partículas en suspensión presentes en el humedal, por adsorción y precipitación sobre partículas en suspensión que, luego, sedimentan sobre el fondo, por procesos de óxido-reducción geoquímica o mediada por bacterias, en las zonas aeróbicas y anaeróbicas, y/o por captura y bioacumulación por plantas y algas (FIGURA 42).

La tecnología de humedales artificiales implica un largo tiempo de aplicación; estos sistemas son diseñados para operar continuamente durante varios años. El sistema requiere una operación sencilla y un limitado costo de mantenimiento y operación; presenta una buena adaptabilidad a las variaciones de carga del influente y una óptima integración paisajística. Los períodos prolongados de sequía pueden afectar la flora y limitar severamente el funcionamiento del humedal.

Esta tecnología ha sido aplicada exitosamente al tratamiento de aguas superficiales contaminadas con materia orgánica de origen animal o vegetal, nutrientes, metales pesados y desechos ácidos y básicos derivados de actividades mineras.

La aplicación de la tecnología de *biopilas* requiere que los sedimentos excavados y trans-

portados sean mezclados con nutrientes, suelo o sedimentos naturales no contaminados y otras enmiendas, habitualmente utilizadas para suelos, y ubicados en áreas confinadas, limitadas por membranas poliméricas impermeables que evitan que se produzcan fenómenos de escurrimiento y percolación fuera de los límites del sistema. Estas zonas de confinamiento suelen ser pozas excavadas en el suelo, donde se disponen los materiales a tratar formando una pila. La pila puede alcanzar 2 a 3 m de altura y es aireada mediante bombas de vacío y aireadores distribuidos en su estructura, y los lixiviados generados como resultado del proceso de degradación son recolectados mediante un sistema de cañerías y trasladados para su tratamiento posterior utilizando alguna tecnología adicional. Las condiciones de humedad y temperatura, las concentraciones de oxígeno y nutrientes, y el pH deben ser controlados adecuadamente durante el proceso.

Las pilas pueden ser cubiertas con membranas plásticas para controlar la escorrentía lateral, la evaporación y la volatilización, y para mantener la temperatura del sistema en los climas fríos. Si entre los contaminantes existen compuestos orgánicos volátiles, éstos se volatilizarán en el ambiente; en consecuencia, la pila debería estar aislada de manera de facilitar la recolección de los gases generados para su tratamiento posterior.

La degradación aeróbica de los compuestos orgánicos presentes en los sedimentos contaminados se produce por la actividad de los microorganismos naturalmente presentes.

Esta tecnología ha sido utilizada exitosamente para reducir la concentración de petróleo e hidrocarburos, plaguicidas, compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles en sedimentos excavados. Requiere un relativamente corto tiempo de aplicación; la duración de la operación varía entre algunas semanas y varios meses dependiendo de las condiciones del sedimento a tratar.

El *compostaje* es una tecnología *ex situ* de remediación que implica la excavación previa de los sedimentos a tratar, su transporte y mezcla con enmiendas orgánicas y agentes que determinen el aumento de volumen, tales como astillas de madera, heno, estiércol y restos vegetales. La mezcla es dispuesta en pilas ubicadas sobre el terreno revestido con membrana polimérica impermeable, para evitar los fenómenos de escorrentía y lixiviación. Los procesos de degradación son llevados a cabo por microorganismos presentes en la mezcla o por lombrices de tierra inoculadas en el sistema. En este último caso, la tecnología es denominada *vermicompostaje*.

La selección de las enmiendas adicionadas al sedimento asegura una adecuada porosidad y proveen un balance apropiado de las concentraciones de carbono y nitrógeno, a fin de favorecer la actividad microbiológica aeróbica.

En esencia, el *compostaje* es un proceso biológico controlado a través del cual los contaminantes orgánicos son convertidos por microorganismos, bajo condiciones aeróbicas o anaeróbicas, o por lombrices de tierra, en condiciones aeróbicas, en subproductos inocuos y estabilizados, esto es, en *humus* (material similar al suelo).

El tamaño óptimo de las pilas de compostaje

Típicamente, en el interior del sistema se mantienen elevadas temperaturas, variables entre 54°C y 65°C, generadas por los procesos metabólicos de los microorganismos degradadores, a fin de que los contaminantes orgánicos sean apropiadamente compostados, esto es, degradados a subproductos estabilizados e inocuos. A fin de obtener una máxima eficiencia en el sistema se requiere mantener:

- ❖ Una adecuada oxigenación, mediante el volteo y mezclado de la pila con una periodicidad diaria
- ❖ Valores apropiados de humedad., a través de la irrigación cuando resulte necesaria, y
- ❖ Un rango de temperatura conveniente.

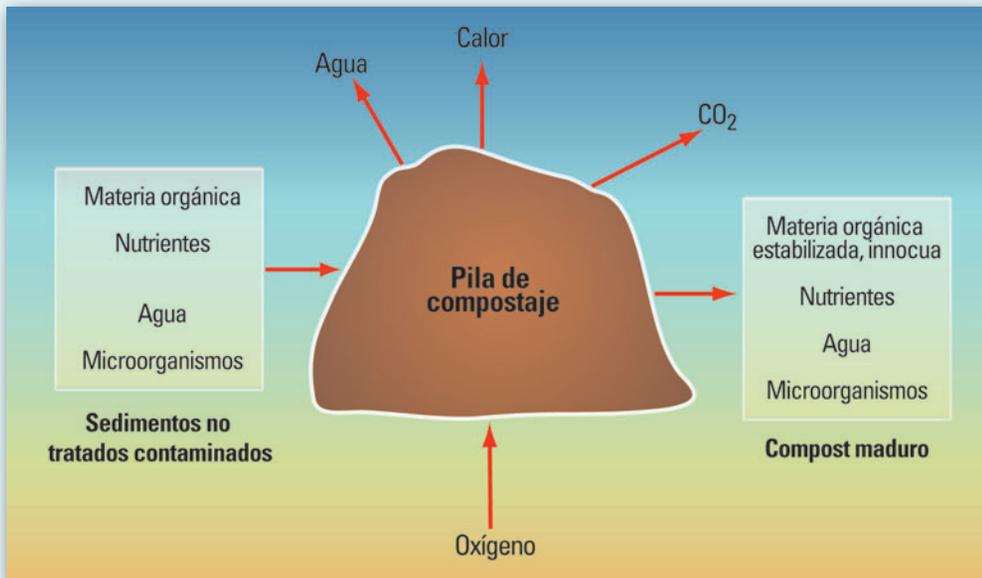
oscila entre los 4 y 5 m de longitud, y 2 m a 3 m de altura, permitiendo la generación de calor suficiente y el mantenimiento de la temperatura interna (FIGURA 43).

Al igual que en el caso de la tecnología de biopilas, si el sedimento contaminado contiene compuestos orgánicos volátiles o semivolátiles, el sistema debería permitir la recolección de los gases emitidos y su tratamiento posterior.

El compostaje ha sido aplicado exitosamente para el tratamiento de sedimentos contaminados con una variedad de compuestos orgánicos biodegradables, tales como explosivos e hidrocarburos aromáticos policíclicos,

En el caso de los procesos de *vermicompostaje*, se disponen lombrices de tierra rojas californianas (*Eisenia foetida*) en depósitos, silos o pilas junto con los sedimentos contaminados para favorecer su degradación y la generación de un compost de alta calidad. La utilización de esta tecnología, a diferencia de la mediada por microorganismos, implica el mantenimiento de temperaturas medias en el sistema, variables entre los 12 y los 25 °C.

El compostaje y el vermicompostaje requieren un adecuado control de los potenciales olores desagradables producidos y un cuidadoso monitoreo y recolección del lixiviado generado por el proceso, que será dirigido hacia un tratamiento posterior.



**Figura 43:** Diagrama esquemático de una pila de compostaje, mostrando los principales procesos de degradación y transformación de los contaminantes producidos en ella (Modificado de U.S. EPA – USAF, 2007).

El “*landfarming*” o *tratamiento en suelo por labranza* es una tecnología de remediación a gran escala, mediante la cual el sedimento excavado es dispuesto en lechos, limitados por membrana polimérica impermeable, formando capas sucesivas, y periódicamente volteados o arados para facilitar su aireación. El sedimento contaminado dispuesto de esa manera interactúa con el suelo, la comunidad microbiológica nativa y las condiciones ambientales naturales del sitio, facilitando la degradación, transformación e inmovilización de la materia orgánica. Básicamente, se trata de un proceso de degradación aeróbica de los contaminantes

orgánicos presentes en el sedimento, mediada por la comunidad microbiológica natural del sitio. El diseño del “landfarming” incorpora sistemas de recolección de lixiviados.

El mantenimiento de un adecuado proceso de degradación implica, como en las tecnologías antes mencionadas, el control de la humedad, aireación, pH y nutrientes en el sistema.

Cuando el nivel deseado de degradación de la materia orgánica es alcanzado, la capa superior de material tratado es removida y se aplica nuevo sedimento a tratar. Inmediatamente, el lecho es arado a fin de mezclar adecuadamente los nuevos materiales con el material remanente en el sitio. De esta manera se utiliza la comunidad microbiológica ya presente en el medio para facilitar la degradación de la nueva capa de sedimento, reduciendo la duración del tratamiento.

El tiempo de duración del tratamiento por “landfarming” es variable, dependiendo del tipo y concentración de los contaminantes presentes y de las características del sedimento a tratar; puede variar entre 1 a varios años.

El “landfarming” es una tecnología que ha sido utilizada exitosamente para tratar sedimentos contaminados con hidrocarburos volátiles, de menor peso molecular, plaguicidas, creosota y agentes preservadores de madera, entre otros compuestos orgánicos.

El proceso de compostaje mediado por microorganismos se produce a través de cuatro etapas con características claramente diferenciadas:

- ❖ Etapa mesofílica: el proceso se inicia a temperatura ambiente; está caracterizada por la proliferación de microorganismos mesófilos y, como consecuencia de su actividad metabólica, la temperatura se eleva lentamente y se producen ácidos orgánicos, como subproductos de degradación, que tienden a reducir el pH del sistema.
- ❖ Etapa termofílica: la temperatura de la pila asciende a valores cercanos a los 40 °C; se observa el predominio de microorganismos termófilos, incluyendo hongos, que transforman el nitrógeno en amoníaco, elevando el pH del medio; la temperatura continúa elevándose hasta alcanzar los 60 °C.
- ❖ Etapa de enfriamiento o mesofílica: la temperatura del sistema inicia un lento descenso; cuando se alcanzan valores inferiores a 40°C, los microorganismos termófilos se hacen menos dominantes y los mesófilos reinician su actividad; el pH del medio desciende ligeramente.
- ❖ Etapa de maduración: la temperatura desciende hasta igualar las condiciones del ambiente; se producen reacciones metabólicas secundarias de condensación y polimerización del humus, llevadas a cabo por los microorganismos mesófilos presentes, las que pueden extenderse durante varios meses hasta completar la estabilización de la materia orgánica.

## Tecnologías de remediación físico-químicas “in situ” y “ex situ”

### 6.1.2

Los tratamientos físico-químicos utilizan las propiedades físicas y químicas de los contaminantes o del medio contaminado para destruir y convertir químicamente en material inocuo, separar o contener la contaminación.

A diferencia de los tratamientos biológicos, estas tecnologías suelen requerir tiempos menores de aplicación y mayores costos de mantenimiento, requerimiento de energía y operación. Los subproductos derivados de algunos de estos procesos requieren ser recolectados y sometidos a tratamientos posteriores, antes de ser reintegrados al ambiente, lo que determina el incremento de la complejidad y los costos asociados.

Al igual que en el caso de los tratamientos biológicos, se han desarrollado tecnologías físico-químicas de remediación para ser aplicadas *in situ* y *ex situ*.

Excede a los límites de este texto discutir en profundidad las diversas tecnologías físico-químicas de remediación, sus combinaciones y numerosas aplicaciones. Su estudio y comprensión implica disponer de un amplio conocimiento previo respecto de las reacciones e interacciones químicas en las que pueden estar involucradas las moléculas orgánicas contaminantes.

Nos referiremos brevemente a algunas de las tecnologías disponibles que han sido aplicadas a la remediación de aguas superficiales y sedimentos contaminados.

Entre las tecnologías físico-químicas de remediación *in situ* aplicadas en aguas superficiales contaminadas, de las cuales existe mayor experiencia, se cuentan:

❖ **Extracción con aire o despojamiento por aire (“air stripping”)**: Es un sistema de tratamiento que remueve compuestos orgánicos volátiles (VOCs) presentes en agua subterránea o agua superficial contaminada mediante la inyección de una corriente de aire comprimido a través del agua subterránea o agua superficial contaminada, lo que causa la evaporación de las sustancias volátiles. Los gases generados por el proceso son recolectados y tratados posteriormente mediante alguna otra tecnología.

❖ **Oxidación química**: se aplican *in situ* agentes oxidantes al sistema de tal manera que se favorece la conversión de contaminantes peligrosos a compuestos no peligrosos o menos tóxicos, más estables, menos móviles y/o inertes. Los agentes oxidantes más comúnmente utilizados en ambientes dulceacuícolas son peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ), ozono, permanganato de potasio ( $MnO_4K$ ), hipoclorito de sodio ( $HONa$ ), cloro y dióxido de cloro ( $OCl_2$ ). Los agentes oxidantes causan una rápida, completa o parcial destrucción química de compuestos orgánicos. Se la ha aplicado exitosamente a ambientes contaminados con tricloroetileno (TCE) y compuestos orgánicos aromáticos, como el benceno.

❖ **Barreras de tratamiento permeables reactivas / pasivas**: Se trata de estructuras en forma de muro o barrera, dispuestas *in situ*, que permiten el pasaje del agua, mientras simultáneamente generan la degradación o remoción de contaminantes. Son diseñadas para interceptar la pluma de contaminantes en el agua, determinando que éstos atraviesen el medio reactivo y se transformen en formas químicas ambientalmente aceptables. Las barreras reactivas más comúnmente empleadas utilizan como medio reactivo gránulos de Fe u otros materiales ferrosos para el tratamiento de contaminantes clorados (TCE, DCE y VOCs halogenados).

