



Programa de la asignatura:

Biorremediación

U3

Estrategias de
Biorremediación



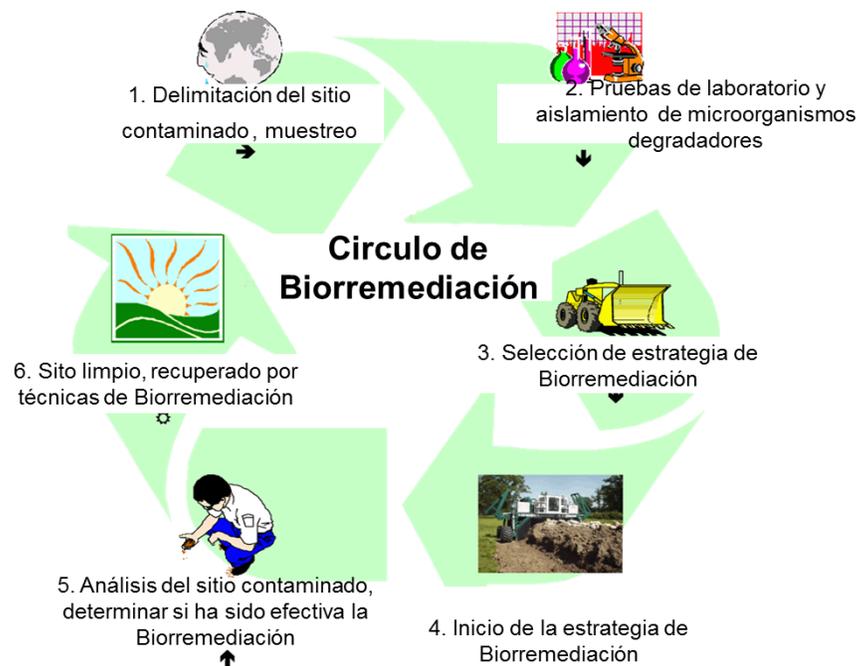
DCSBA



BIOTECNOLOGÍA



Estrategias de Biorremediación



Circulo de la Biorremediación.

Tomado de:

https://www.google.com.mx/search?q=bioremediation+strategies&espv=2&biw=1366&bih=662&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKewjhjtYg_TQAhUB6mMKHcVQBA4Q_AUIBigB#tbm=isch&q=bioremediation+images&imgsrc=ZFEW-qaHn2V7M%3A%2Fpii%2FS0167779908000231%3Fshowall%3Dtrue/



Índice

Presentación de la unidad.....	4
Competencia específica de la unidad.....	5
Propósitos de la unidad.....	5
3.1 Biorremediación <i>in situ</i>	6
3.1.1 Bioestimulación.....	11
3.1.2 Bioaumentación.....	14
3.1.3 Bioventeo.....	16
3.1.4 Biosparging.....	17
3.1.5 Atenuación Natural.....	18
3.2 Biorremediación <i>ex situ</i>	21
3.2.1 Biorreactores.....	24
3.2.2 Composteo.....	26
3.2.3 Biopilas.....	27
3.2.4 Biolabranza.....	29
3.3 Fitorremediación.....	32
3.3.1 Tipos de remediación mediante el empleo de plantas.....	33
3.3.2 Alcances de la Fitorremediación.....	38
Cierre de Unidad.....	38
Para saber más.....	39
Fuentes de consulta.....	40



Presentación de la unidad

En la Unidad 1, revisamos que la Biorremediación se define como el uso de seres vivos para restaurar ambientes contaminados. Y en la Unidad 2, revisamos algunos seres vivos que participan en los procesos de Biorremediación, así como las rutas metabólicas que se llevan a cabo en este proceso.

La Biorremediación utiliza bacterias, hongos y plantas que se pueden presentar de forma natural para degradar o desintoxicar sustancias peligrosas para la salud de los humanos y/o del medio ambiente. Estos organismos pueden pertenecer al área contaminada o pueden ser aislados de alguna otra parte e introducirse en el sitio contaminado. Los compuestos contaminantes son entonces transformados por estos organismos a través de reacciones que suceden a través de su metabolismo. Y un aspecto relevante que debemos recordar es el hecho de que la degradación de los compuestos contaminantes es generalmente llevada a cabo por múltiples microorganismos, los llamados consorcios.

Pero, también debemos reconocer que la naturaleza química de los contaminantes es importante, en cuyo caso la biorremediación se ha enfocado principalmente en los compuestos contaminantes orgánicos (hidrocarburos del petróleo, compuestos orgánicos volátiles, pesticidas, solventes orgánicos y preservadores de madera).

Por otro lado, como ya revisamos en la Unidad 2, los contaminantes orgánicos no pueden ser degradados (metales y radionucleótidos), ya que solo puede ser usada para cambiar el estado de valencia de los compuestos inorgánicos y por tanto lograr la absorción y acumulación de los compuestos inorgánicos en los organismos empleados para este fin (microorganismos, hongos, algas y plantas).

En esta Unidad revisaremos las estrategias de Biorremediación con el fin de seleccionar y diseñar un método de biorremediación adecuado al tipo de ambiente que se quiere recuperar.



Propósitos de la unidad



Esta unidad tiene el propósito de:

- Distinguir las estrategias de biorremediación
- Analizar los procesos de biorremediación *in situ*
- Analizar los procesos de biorremediación *ex situ*
- Identificar el proceso de fitorremediación y sus alcances.
- Diseñar una estrategia de biorremediación para recuperar un ambiente contaminado.

Competencia específica de la unidad





Diseñar una estrategia de biorremediación, para recuperar ambientes alterados por contaminantes, mediante la distinción de las técnicas de biorremediación.

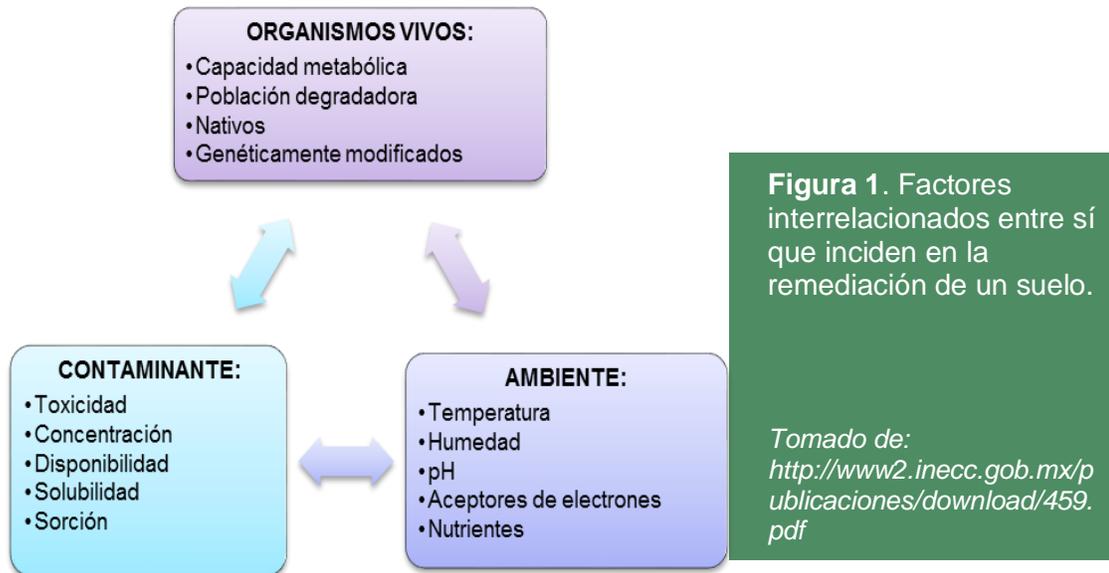
3.1 Biorremediación *in situ*

La biorremediación *in situ* involucra el tratamiento de los contaminantes en el lugar donde sucede el evento, tiene por objetivo crear un ambiente adecuado para el crecimiento de los microorganismos. Lo cual puede lograrse con la adición de aire (bioventeo), nutrientes (bioestimulación), microorganismos (bioaumentación) y humedad, además se debe controlar la temperatura y pH (Volke-Sepúlveda y Velasco-Trejo, 2012).

Enlaces

Como recordaras en la Unidad 1 revisamos algunas de las consideraciones que se deben tener en cuenta antes de seleccionar cualquier estrategia de Biorremediación.

Estas consideraciones están relacionadas con las condiciones ambientales que pueden alentar o detener el proceso de biodegradación (Figura 1)



Por lo que antes de seleccionar una estrategia de Biorremediación es necesario realizar una investigación de factibilidad en el sitio a remediar. Las características que deben ser identificadas en el sitio son:

- Biodegradabilidad de los contaminantes;
- Distribución de los contaminantes en el suelo, agua, en líquidos de fase no acuosa, y de fases de vapor;
- Potencial de lixiviación de los contaminantes (por ejemplo, la solubilidad en agua y el coeficiente de absorción en suelo);
- Reactividad química de los contaminantes (por ejemplo, las tendencias hacia las reacciones no biológicas, tales como polimerización, hidrólisis y oxidación);
- Profundidad y la extensión de los contaminantes;
- Tipo de suelo y sus propiedades (por ejemplo, contenido de carbono orgánico, contenido de minerales, pH, porosidad, permeabilidad, densidad aparente, contenido de humedad, nivel de nutrientes, la capacidad de retención de agua);
- Competencia por oxígeno (por ejemplo, el potencial oxido-reducción, los niveles ambientales de oxígeno);
- Presencia o ausencia de sustancias que son tóxicas para los microorganismos;
- Capacidad de los microorganismos en el suelo para degradar los contaminantes.



Ahora bien, las características ideales de los sitios para llevar a cabo una implementación exitosa de la biorremediación *in situ* incluyen:

- Acuíferos homogéneos y permeables;
- Contaminantes generados por una sola fuente;
- Homogeneidad en términos de concentración y tipo de contaminantes cuando se trata de aguas subterráneas;
- Contaminante este libre;
- Contaminantes fácilmente degradables, extraíbles o inmovilizados

Aunque la mayoría de los sitios no cumplen con todos estos criterios, las estrategias de biorremediación *in situ* pueden ser desarrolladas para sitios no ideales. Por tanto, las estrategias de biorremediación *in situ* y de biorremediación en general, deben ser desarrolladas con datos geológicos y microbiológicos específicos del sitio, combinados con el conocimiento químico, físico y bioquímico (Tabla 1), con objeto de poder eliminar eficientemente el contaminante presente (Van-Cauwenberghe y Roote, 1998).



Tabla 1. Factores que influyen en el proceso de Biorremediación.

Factores favorables		Factores desfavorables	
Características químicas	Características hidrogeológicas	Características químicas	Características hidrogeológicas
Abundancia de hidrocarburos lineales	Media porosidad	Presencia de componentes pesados	Rocas fracturadas
Bajas concentraciones	Alta permeabilidad	Mezclas de compuestos orgánicos e inorgánicos	Baja permeabilidad
Presencia de poblaciones microbianas diversas	Mineralogía uniforme	Concentraciones tóxicas	Mineralogía compleja
Adecuada oxigenación	Homogeneidad	Escasa actividad microbiana	Heterogeneidad
pH= 6-8		Ambientes anóxicos	
Temperaturas superiores a 15 oC		pH extremos	
		Temperaturas bajas	

<http://www.miliarium.com/prontuario/TratamientoSuelos/Bioestimulacion.asp>

El proceso tecnológico de biorremediación *in situ* consiste en las siguientes actividades.

1. Una investigación para determinar el transporte y destino de los constituyentes de desperdicio orgánico en el sitio contaminado.
2. Realización de estudios de tratabilidad para determinar el potencial para biorremediación y para definir las prácticas de operación y gestión.



3. Remoción de las fuentes contaminantes y la recuperación de los productos disponibles.
4. Diseño e implementación de un plan de biorremediación basado en principios fundamentales de ingeniería.
5. Establecer un programa de vigilancia para evaluar el desempeño de los esfuerzos de biorremediación.

Por otro lado, la biorremediación *in situ* presenta algunas limitaciones como pueden ser, la falta de oxígeno ya que esto puede incidir directamente en el metabolismo aeróbico de algunos microorganismos, ya que generalmente, el oxígeno, es el aceptor de electrones. Otra limitación puede ser los factores de permeabilidad y el grado de heterogeneidad química de los contaminantes, ya que son los principales factores que gobiernan el transporte por difusión en el subsuelo, donde una alta permeabilidad favorece la remoción de los contaminantes porque favorece la disponibilidad de sustrato. Por lo contrario, una baja permeabilidad traducida como un bajo transporte por difusión no resulta una opción viable para la biorremediación *in situ*, de ahí que la remoción en zonas saturadas de contaminantes en suelos arcillosos puede ser mucho más difícil de aplicar.

Como hemos señalado anteriormente, el oxígeno es el aceptor de electrones preferido y necesario para la biodegradación en condiciones aeróbicas. En una fase acuosa, la concentración de oxígeno residual es: >1.0 mg/L y puede ser monitoreado para asegurarse que los niveles de oxígeno no sean un factor limitante. En las fases gaseosas, el oxígeno residual puede ser mantenido a >2 mg/L a 4% (por volumen) para asegurar cantidades suficiente de oxígeno.

Otro punto importante involucra a los actores principales de la biorremediación, los microorganismos. Estas razones microbiológicas son: que las bacterias nativas en algunos casos no contienen la información genética necesaria para producir las enzimas requeridas para degradar el contaminante de interés. Si una población activa de microorganismos nativos no está presente en el sitio, se puede sospechar de la presencia de condiciones inhibitorias o tóxicas y, por tanto, se deben considerar otras alternativas. Por ejemplo, una baja disponibilidad de los hidrocarburos para los microorganismos, puede ser por sí misma una condición que inhiba la degradación.



Para los nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, un rango típico con respecto al carbono está dado por la relación C:N:P como C=100:N=10:P=1 sobre la base del peso, y se debe asegurar que estén presentes niveles adecuados de N y P para la biorremediación. Se considera un rango de pH para la biorremediación de 5.5 a 8.5 para una óptima eficiencia. La humedad se considera que debe estar en el rango de 25 a 85%. Lo óptimo de humedad es de 75% o superior para mantener la actividad microbiana.

Se ha reportado que los factores que influyen el capital y los costos operativos de la biorremediación incluyen:

- Tipos y cantidades de compuestos orgánicos presentes;
- Condiciones del sitio;
- Volumen del material a ser procesado;
- Objetivos específicos del sitio a ser remediado;
- Naturaleza y profundidad de los contaminantes; y,
- Uso de bioaumentadores y/o peróxido de hidrógeno u otros aditivos mejoradores.

Hay muchas variables en el diseño y operación que deben ser considerados para establecer rangos certeros de costos. Sin embargo, los costos típicos reportados en Estados Unidos para la biorremediación *in situ* están el rango de \$ 30 a \$ 100 dólares por metro cúbico de suelo. La contaminación de agua subterránea y de suelo puede ser tratada simultáneamente proveyendo ventajas en los costos. Cuando se usa peróxido de hidrógeno para mejorar la biorremediación, los costos típicos bajan de \$10 a \$20 dólares por 1,000 litros de agua subterránea tratada. Los costos de mantenimiento y de operación pueden ser significativos debido a la alimentación continua de peróxido de hidrógeno al agua de subsuelo contaminada (Van-Cauwenberghe y Roote, 1998; US.EPA, 1991).

Por tanto, con este marco de referencia general nos enfocaremos ahora a revisar las técnicas de biorremediación *in situ*: bioestimulación, bioaumentación, bioventeo, y biosparging.

3.1.1 Bioestimulación



La bioestimulación es una técnica *in situ* donde la biodegradación en el suelo puede ser estimulada u optimizada por la adición de soluciones acuosas acarreadoras de nutrientes, aceptores de electrones u otros aditivos enmendadores. Esta tecnología está diseñada primeramente para tratar los suelos y aguas subterráneas contaminadas con combustibles, compuestos orgánicos volátiles no halogenados (COVs) y compuestos orgánicos semi volátiles (SCOVs), pesticidas, y herbicidas. Estos procesos pueden ser aplicados para compuestos orgánicos halogenados, pero algunas veces es menos efectivo.

Esta tecnología requiere la presencia de organismos nativos capaces de degradar los contaminantes de interés. También, es necesario que los contaminantes estén disponibles para los organismos y que no estén fuertemente absorbidos a las partículas del suelo.

La técnica requiere de generar pozos en las zonas contaminadas a través de los cuales son introducidos los nutrientes suplementados en solución acuosa y a su vez, se requiere de otros pozos por donde saldrá el agua que se libera de la contaminación.

Esta técnica *in situ* puede aplicarse en condiciones aerobias o anaerobias:

Bioestimulación aerobia: Comúnmente se utiliza la inyección de agua con nutrientes y oxígeno para favorecer el metabolismo aerobio (utilizan oxígeno como aceptor final de electrones) cuyos microorganismos degradan la biomasa hasta su conversión en dióxido de carbono, agua y nueva biomasa.

Bioestimulación anaerobia: A diferencia del anterior tipo, en esta técnica los microorganismos anaerobios metabolizan los contaminantes y pueden generar metano, dióxido de carbono e hidrógeno molecular. En el caso de condiciones sulfato-reductoras se puede obtener azufre elemental o ion sulfuro; en condiciones nitrato-reductoras se obtiene nitrógeno molecular. Generalmente, es posible que a través de esta técnica se generen intermediarios más tóxicos que requieren a su vez de una bioestimulación aerobia.

Por ejemplo, podemos revisar el caso de la biorremediación del tricloroetileno (TCE), el cual es un agente contaminante común de aguas subterráneas y puede ser transformado por monooxigenasas de metano y tolueno. Lo anterior se logra al suplementar el medio contaminado con



metano o tolueno como un co-sustrato, esto estimula la formación de un consorcio bacteriano en el que pueden utilizar el metano y co-metabolizar el tricloroetileno, el sistema se presenta en la Figura 2.

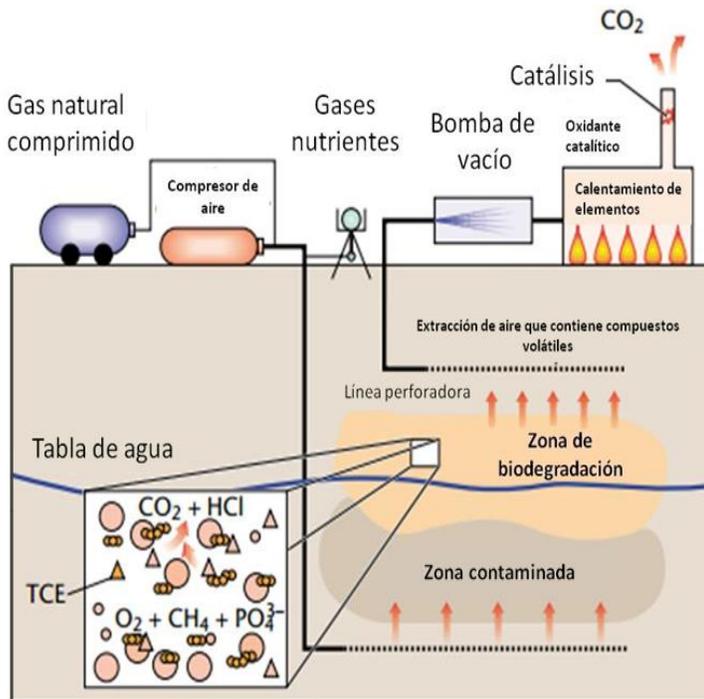


Figura 2. Proceso de biorremediación de aguas subterráneas contaminadas por TCE a través de la bioestimulación

Tomado de: Philp y col., 2001

La bioestimulación no es aplicable en los sitios donde hay altas concentraciones de sales inorgánicas, metales pesados, debido a que la inyección de soluciones acuosas a través del suelo puede aumentar la movilidad de los contaminantes y por lo tanto requerir tratamiento de agua subterránea subyacente. Puede ocurrir una colonización preferencial por algunos microorganismos, lo cual puede causar la obstrucción de la inyección de nutrientes y de los pozos de inyección de agua (Mohee y Mudhoo, 2012).

La limpieza de un sitio contaminado puede tardar varios años y su costo esta entre 30 y 100 USD/m³. Hay que considerar que la naturaleza y profundidad de los contaminantes, así como el empleo de bioaumentación puede incrementar sus costos (Van Deuren y col. 1997).



3.1.2 Bioaumentación

La bioaumentación consiste en la adición de microorganismos para mejorar una actividad biológica específica, esta se ha practicado durante años en diversas áreas, incluyendo la agricultura y la silvicultura y el tratamiento de aguas residuales. La bioaumentación generalmente no es aceptada como una técnica eficiente para la biorremediación del suelo, aunque quienes la proponen continúan demostrando posibles ventajas.

El empleo de la bioaumentación se apoya en estudios que muestran la incompetencia de microorganismos nativos y la aparente mejora de la tasa de biorremediación después de la adición de microorganismos competentes. La reinoculación del suelo con microorganismos nativos, directamente aislados del mismo suelo se incluye a menudo en el término bioaumentación.

Hoy en día, se pueden diseñar estrategias para tener éxito con la bioaumentación, en las que se deben considerar los siguientes parámetros:

- Características de los contaminantes: biodisponibilidad, concentración, y toxicidad sobre los microorganismos.
- Características físico-químicas del suelo: humedad o contenido de agua, contenido de materia orgánica, contenido de arcilla y pH.
- Ecología microbiana: presencia de depredadores y competencia entre especies.
- Microbiología: la presencia de co-sustratos, genética de los organismos y estabilidad y actividad enzimática, método de inoculación, presencia o ausencia de actividad microbiana nativa.

La bioaumentación se ha empleado en el tratamiento de suelos contaminados con **herbicidas** (2,4-D), **insecticidas** (lindano, clordano, paratión), **clorofenoles** (PCP) y **nitrofenoles, bifenilos policlorados** (BPC), **hidrocarburos totales del petróleo** (HTP) e **hidrocarburos aromáticos policíclicos** (HAP) (Alexander, 1994). Así como, en el tratamiento de desechos con concentraciones relativamente altas de metales (Eweis y col. 1998).

Antes de llevar a cabo la bioaumentación en un sitio, deben realizarse cultivos de enriquecimiento, aislar microorganismos capaces de



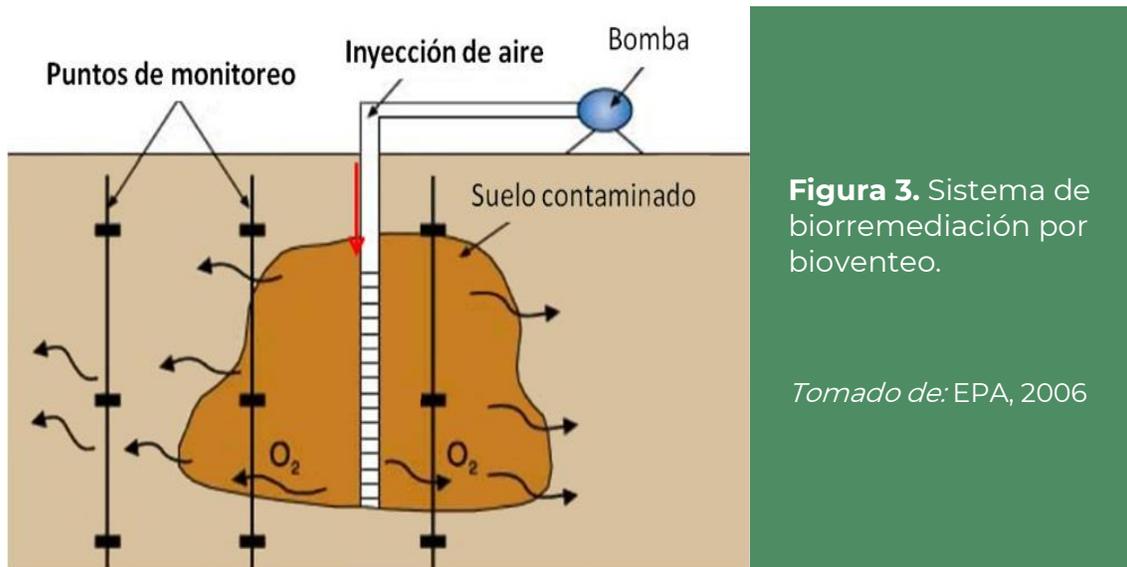
cometabolizar o utilizar el contaminante como fuente de carbono, y cultivarlos hasta obtener grandes cantidades de biomasa (Alexander 1994), ya que el tamaño del inoculo depende del tamaño del sitio contaminado, de la dispersión de los contaminantes y de la velocidad de crecimiento de los microorganismos degradadores (Riser-Roberts 1998).

La bioaumentación es una tecnología que puede tardar varios meses o años, y su costo oscila entre los 25 y 100 USD/m³ Van Deuren y col. 1997).



3.1.3 Bioventeo

El bioventeo es una tecnología a mediano y largo plazo, cuyo objetivo es estimular la biodegradación natural de cualquier compuesto biodegradable en condiciones aerobias mediante la circulación de aire. El aire se suministra en el sitio contaminado a través de pozos de extracción, por movimiento forzado (extracción o inyección), con bajas velocidades de flujo, con el fin de proveer solamente el oxígeno necesario para sostener la actividad de los microorganismos degradadores (Figura 3) (Volke-Sepulveda y Velasco-Trejo, 2002). Además, la lenta circulación del aire favorece la degradación de compuestos semivolátiles a medida que son transportados por el subsuelo.



Esta tecnología se emplea principalmente para tratar suelos contaminados con compuestos orgánicos biodegradables como: hidrocarburos del petróleo, aceites minerales, queroseno y algunos pesticidas. Además, de eliminar compuestos orgánicos la biodegradación puede modificar el estado de oxidación de compuestos inorgánicos promoviendo su precipitación, adsorción o asimilación dentro de los microorganismos disminuyendo así la movilidad del contaminante en el suelo.

Existen factores que limitan la eficiencia del bioventeo como son: el tipo y la concentración del contaminante, la falta de nutrientes; el bajo contenido



de humedad y la dificultad para alcanzar el flujo de aire necesario (Eweis y col. 1998).

Con esta tecnología se suele lograr una remediación en un periodo superior a los dos años y su costo de operación oscila entre 10 y 70 USD/m³. Esta tecnología no requiere de equipo caro, pero los costos pueden variar en función de la permeabilidad del suelo, espacio disponible, número de pozos y velocidad de bombeo (Volke-Sepulveda, 2002).

3.1.4 Biosparging

El biosparging es una variante del bioventeo, que se aplica en acuíferos y tiene por objetivo la estimulación de la flora microbiana nativa para la degradación de compuestos biodegradables. Mediante pozos de inyección, se introduce oxígeno en el lecho acuoso (Figura 4)

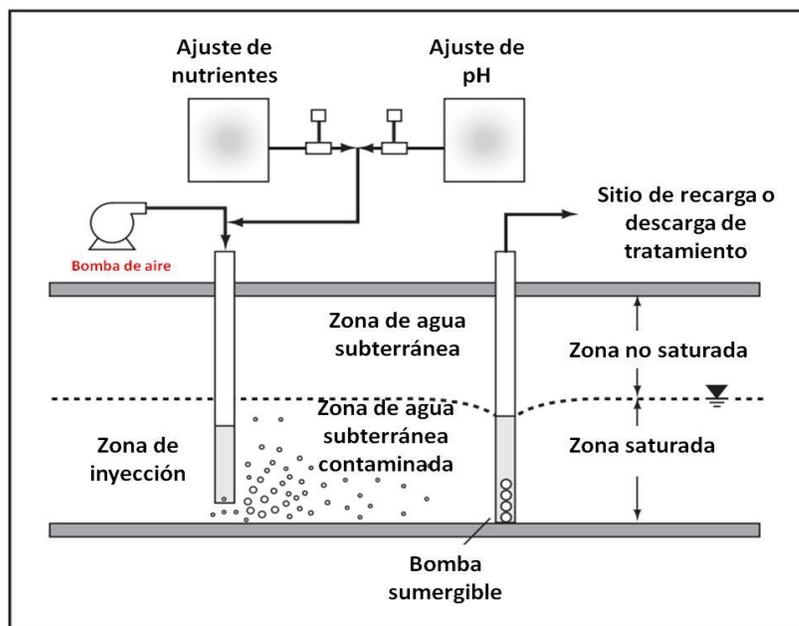


Figura 4. Esquema de biorremediación por aireación.

Tomado de: EPA, 2006

El biosparging requiere la presencia de organismos autóctonos capaces de degradar los contaminantes de interés, y se puede optimizar el proceso suplementado nutrientes para favorecer aún más el crecimiento de estos organismos.



Esta metodología está diseñada para tratar agua subterránea contaminada por **hidrocarburos del petróleo, disolventes no halogenados, aceites minerales, queroseno** y algunos **pesticidas**. Además, de eliminar compuestos orgánicos la biodegradación puede modificar el estado de oxidación de compuestos inorgánicos promoviendo su precipitación, adsorción o asimilación dentro de los microorganismos disminuyendo así la movilidad del contaminante en el suelo.

El tratamiento por biosparging puede llegar a costar entre 10 y 70 USD/m³ en condiciones favorables. El equipo que se emplea es barato y simple, no requiere de mantenimiento. Esta es una tecnología a mediano y largo plazo, siendo sus periodos de recuperación del sitio contaminado mayores a los dos años.

3.1.5 Atenuación Natural

La atenuación natural o biorremediación intrínseca, emplea los procesos naturales de suelos y aguas subterráneas que llevan a la reducción de masa, toxicidad, movilidad, volumen o concentración de los contaminantes presentes en estos sitios.

De igual manera, emplea mecanismos tanto físicoquímicos (difusión, volatilización, disolución, adsorción y dispersión) como biológicos para disminuir la concentración de los contaminantes.

Los procesos de atenuación natural suelen clasificarse en **destructivos** (destruyen el contaminante) y **no destructivos** (disminuyen la concentración del contaminante). Estos pueden reducir la concentración del contaminante por procesos destructivos como la biodegradación y transformaciones químicas, o disminuir su concentración por dilución o dispersión, o mediante la unión de los contaminantes a partículas de suelo (adsorción) de manera que el contaminante no se extienda más.

Los compuestos que pueden ser tratados vía atenuación natural son los **hidrocarburos del petróleo, compuestos orgánicos volátiles, y semivolátiles**, algunos compuestos **halogenados**.

La atenuación natural depende de diversas condiciones por lo que es necesario caracterizar bien el sitio contaminado para determinar si esta



técnica logrará el objetivo de disminuir los contaminantes. Los suelos con gran cantidad de **materia orgánica (zonas pantanosas)** con frecuencia son aptos para la atenuación natural.

También es una opción aceptable para lugares donde se haya disminuido la concentración del contaminante al aplicar algún otro método de biorremediación.

La principal ventaja de esta técnica es su bajo nivel de intervención, con lo que se disminuyen los costos e impactos sobre el suelo. Mientras que una de las principales desventajas de la técnica es que se necesitan largos periodos de tiempo para obtener los resultados deseados. Debemos recordar que, los procesos naturales son lentos y se necesita una vigilancia a largo plazo para comprobar que la concentración de los contaminantes vaya disminuyendo.

Acabamos de revisar las estrategias de biorremediación *in situ*, a continuación, se presenta un breve resumen de las etapas de trabajo necesarias para aplicar este tipo de estrategias.



Etapas de trabajo en el proceso de biorremediación

- 1. Investigación y caracterización de la contaminación y el sitio a remediar** determinación de la composición química de los contaminantes, concentración, identificación de los microorganismos nativos, niveles de oxígeno, pH y temperaturas; así como de las características hidrogeológicas.
- 2. Análisis y elección de las medidas biocorrectivas** en función del estudio realizado determinar la técnica de biorremediación que se ajuste a las condiciones encontradas
- 3. Evaluación de la efectividad del sistema elegido** se debe contar con técnicas de evaluación, por ejemplo, medición de la concentración de contaminantes, pruebas de función biológica como la respirometría (técnica que mide el consumo de oxígeno) entre otras, de tal forma que se cuente con indicadores
- 4. Diseño y evaluación del sistema** al implementar la técnica de biorremediación se debe valorar acorde a los indicadores previamente establecidos
- 5. Valoración del control y seguimiento** durante toda la etapa del proceso se requiere de un monitoreo estricto a fin de identificar cualquier eventualidad y estimar el proceso de la biorremediación
- 6. Análisis e interpretación de resultados** los resultados obtenidos podrán analizarse estadísticamente para poder determinar la confiabilidad y efectividad de la técnica in situ aplicada



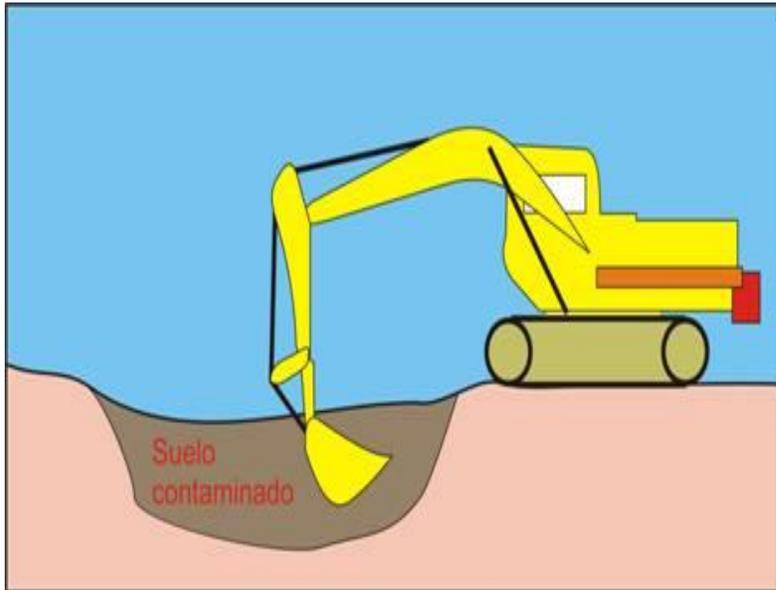
En la Tabla 2, se presentan las diferencias entre las estrategias de biorremediación *in situ*:

Tabla 2. Diferencias entre las estrategias de biorremediación *in situ*.

Estrategia de Biorremediación	Sitio de contaminación	Necesidades	Microorganismos
Bioestimulación	Suelos y aguas subterráneas	Distintos nutrientes	Aerobios Anaerobios
Bioaumentación	Suelos y aguas subterráneas	Adición de microorganismos	Aerobios Anaerobios
Bioventeo	Suelos y aguas subterráneas	Suplemento de aire	Aerobios Anaerobios
Biosparging	Aguas subterráneas	Oxígeno	Aerobios
Atenuación Natural	Suelos y aguas subterráneas	Ninguno	Aerobios Anaerobios

3.2 Biorremediación *ex situ*

En la Biorremediación *ex situ*, el suelo contaminado es removido de su sitio y tratado en un sitio externo, para la eliminación de los contaminantes, a través de varias estrategias. Una vez que el suelo ha sido descontaminado este puede ser devuelto a su sitio de origen (Figura 5).

**Figura 5.**

Biorremediación *ex situ* donde el material contaminado es llevado a un sitio específico donde se puede contener y tratar de forma controlada.

Tomado de: EPA, 2006

Las estrategias de biorremediación *ex situ* remueven los contaminantes y se colocan en un ambiente limitado y controlado. Este ambiente permite la vigilancia y mantenimiento de las condiciones de biorremediación y por lo tanto un progreso más fácil, con lo que el proceso de biorremediación es un evento **más rápido**. Sin embargo, el transporte del material contaminado del sitio del evento consume tiempo, **aumenta los costos** y es **potencialmente peligroso**, ya que los contaminantes se traen a la superficie y, por tanto, se incrementa la exposición de los trabajadores y el público en general al material tóxico.

Dependiendo del estado del contaminante a eliminar, la biorremediación *ex situ* se clasifica como (Figura 6):

1. Sistemas de fase sólida (composteo, biopilas y biolabranza)
2. Sistemas de fase de lodos y líquida (Biorreactores)

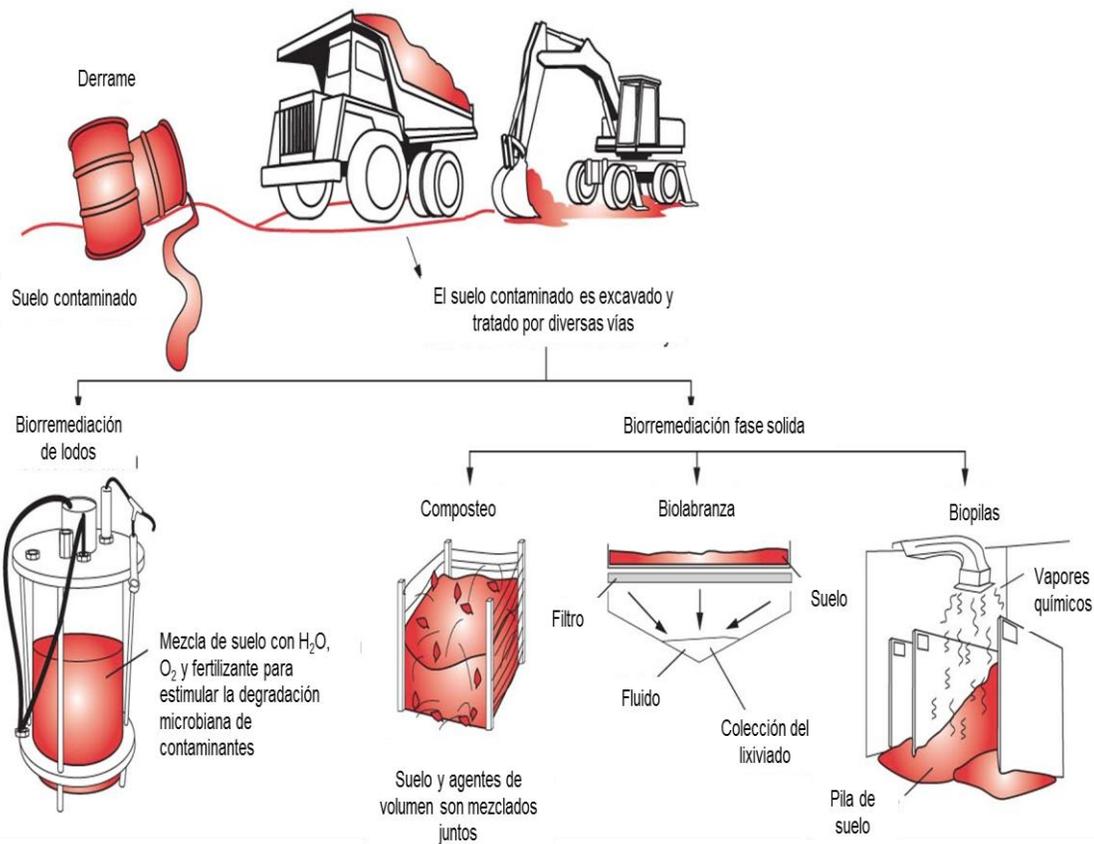


Figura 6. Estrategias de Biorremediación *ex situ*.

Tomado de: EPA, 2006

Estos métodos de tratamiento son altamente invasivos, por lo tanto, el costo y los peligros de la excavación tienen que ser valoradas contra los beneficios que puede traer este tipo de tratamiento. Sin embargo; la Biorremediación *ex situ* presenta algunas **ventajas** como el tener un gran **control sobre el proceso** por lo que el proceso de limpieza se realiza de una manera más rápida. El **costo del muestreo para los análisis de laboratorio se reduce** ya que no es necesario introducir aparatos de muestreo en el suelo profundo. Además, hay **mayor certeza sobre el éxito del tratamiento** ya que todo el suelo tratado está disponible para su inspección (Philp y col., 2001).



Las técnicas de biorremediación *ex situ* solo se aplican bajo condiciones específicas debido a los altos costos, en particular, a los originados de la infraestructura requerida. La biorremediación *ex situ*, solo se debe aplicar en los siguientes casos:

- Suelo altamente contaminado.
- El suelo contaminado muestra una permeabilidad hidráulica o neumática baja.
- En el transcurso de una construcción el suelo contaminado será excavado de todas formas o un uso rápido del sitio no permitirá un tiempo prolongado de medidas de remediación y por tanto, sólo un intercambio del suelo será considerado.
- La masa del suelo contaminado es pequeña y puede ser excavada fácilmente
- El tipo de contaminantes o las características de la contaminación (por ejemplo, presentes en forma de pequeños pedacitos o fases residuales) pueden hacer parecer la técnica de biorremediación *in situ* poco promisoría (International Centre for Soil and contaminated Sites, 2006).

A continuación, revisaremos las principales estrategias de biorremediación *ex situ*.

3.2.1 Biorreactores

Los biorreactores se emplean en el tratamiento de suelos heterogéneos y poco permeables, o cuando se tiene poco tiempo para realizar la limpieza del sitio; pues en esta estrategia se puede combinar controlada y eficientemente, procesos químicos, físicos y biológicos, que mejoren y aceleren la biodegradación (Reiser-Roberts 1998). Estos son la mejor estrategia cuando existen peligros potenciales de descargas y emisiones.

Los biorreactores pueden ser usados para el tratamiento de **líquidos** (corrientes de procesos industriales, agua subterránea), **vapores** (solventes desahogados del subsuelo de ambientes contaminados, aires de fábricas) o **sólidos en fases de suspensión** (suelos excavados, lodos, sedimentos). Para suelos contaminados y sedimentos, un tren de tratamiento basado en biorreactores simula un sistema mezclado de remediación de lodos.



Los biorreactores pueden emplear biopelículas o microorganismos suspendidos, poblaciones microbianas nativas provenientes del material a ser tratado; cultivos microbianos aislados de ambientes apropiados; microorganismos específicos modificados genéticamente. Los biorreactores pueden operar aeróbica o anaeróbicamente y con alimentación apropiada de nutrientes (nitrógeno, fósforo, minerales traza y con sustratos). Otras variables que pueden ser controladas incluyen la proporción de sólidos al agua, velocidades de biodegradación para contaminantes específicos o mezclas de contaminantes, la adsorción/absorción de contaminantes a matrices, tales como suelos o acarreadores usados para proveer superficies para las biopelículas, pH, temperatura y potencial oxido reducción (Philp y col., 2001).

Hay numerosos y diferentes tipos de reactores que se pueden aplicar al tratamiento de suelos. Así, en términos muy simples, los reactores consisten en los mismos componentes, sin embargo, son diferentes en su diseño y operación.

Uno de los reactores más utilizados para biorremediar suelos es el **biorreactor de lodos**, en el cual el suelo contaminado se mezcla constantemente con un líquido, y la degradación se lleva a cabo en la fase acuosa por microorganismos en suspensión o inmovilizados en la fase sólida (Figura 7). El tratamiento puede realizarse también en lagunas construidas para este fin o bien en reactores sofisticados con control automático de mezclado (Volke-Sepulveda 2002). Los biorreactores de lodos aerobios, se emplean principalmente para tratar hidrocarburos totales del petróleo, compuestos orgánicos semivolátiles no halogenados, compuestos orgánicos volátiles.

Otro tipo de reactores empleados son los **secuenciales de lodos aerobios/anaerobios** para tratar bifenilos policlorados, compuestos orgánicos semivolátiles halogenados, pesticidas (Volke-Sepulveda 2002).

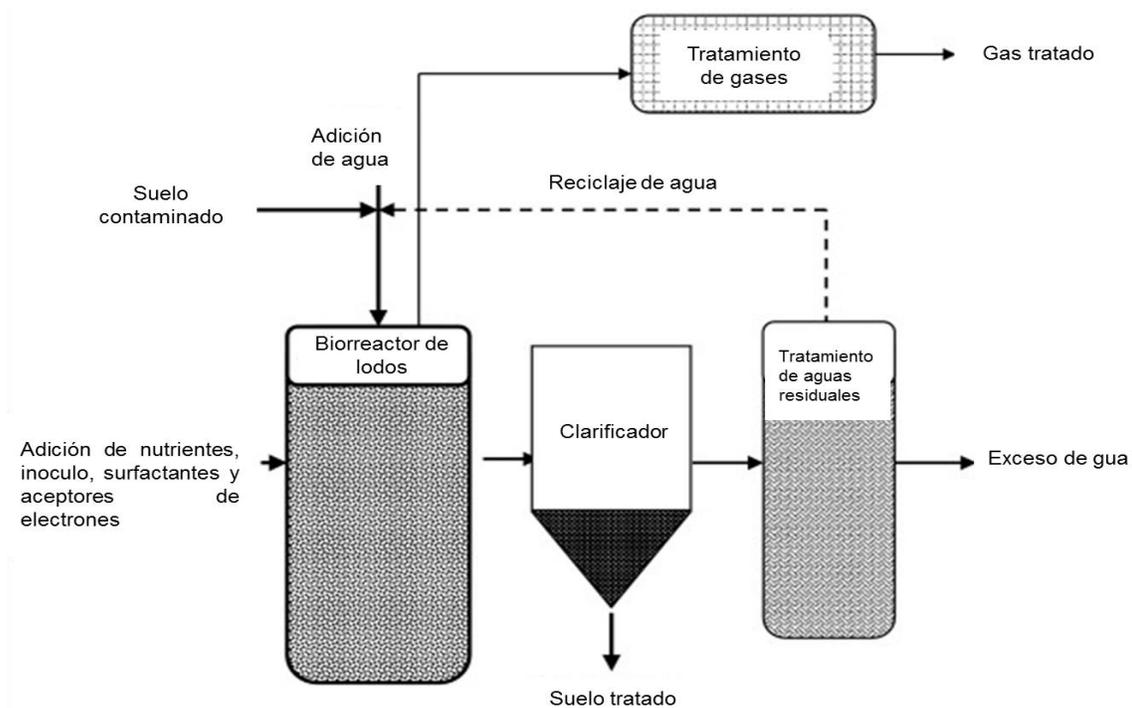


Figura 7. Diagrama de flujo de un biorreactor típico de lodos

Tomado de: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2292675/>

El uso de biorreactores como estrategia de biorremediación tiene algunos factores que limitan su uso y efectividad como son: el suelo debe tamizarse; los suelos heterogéneos y arcillosos pueden generar problemas de manipulación; los productos intermedios pueden ser más tóxicos que el contaminante original (en caso de explosivos o solventes clorados); los residuos pueden requerir de tratamiento o disposición final (Volke-Sepulveda 2002).

El tiempo en el que se logra tener un buen resultado de biorremediación empleando biorreactores es corto, aunque su costo resulta ser elevado entre 130 y 200 USD/m³.

3.2.2 Composteo

El composteo consiste en un proceso biológico mediante el cual es posible transformar residuos orgánicos en materia orgánica estable (composta madura), gracias a la acción de diversos microorganismos. Las principales aplicaciones del composteo son el tratamiento de residuos agrícolas, de desechos de jardinería y cocina, de residuos sólidos municipales y de lodos.



Sin embargo, desde hace algunos años, gracias a diversas investigaciones se ha demostrado que el proceso de composteo, así como el uso de composta madura, es una solución de bajo costo y tecnológicamente efectiva para remediar suelos contaminados por residuos orgánicos peligrosos como los hidrocarburos totales del petróleo, solventes, explosivos, pesticidas e hidrocarburos aromáticos policíclicos (Eweis y col. 1998: 19, Semple y col. 2001: 18).

Composteo

Proceso biológico controlado mediante el cual se limpian suelos y sedimentos contaminados con materiales orgánicos, principalmente hidrocarburos totales del petróleo, para obtener subproductos inocuos estables.

En esta estrategia de biorremediación el material contaminado se mezcla con sustancias orgánicas sólidas biodegradables (agentes de volumen como paja, aserrín, estiércol, desechos agrícolas); estas sustancias de volumen son adicionadas con la finalidad de mejorar la cantidad de nutrientes, y para asegurar una mejor aireación, así como, para la generación del calor durante el proceso.

La técnica de composteo se ha empleado para limpiar suelos contaminados con **bifenilos policlorados, gasolinas, hidrocarburos totales del petróleo e hidrocarburos aromáticos policíclicos**. Y existen estudios que demuestran que con esta estrategia se puede disminuir la concentración y toxicidad de explosivos (TNT)

3.2.3 Biopilas

Las biopilas son un método de composteo en el que, además de agentes de volumen, el sistema es adicionado con agua y nutrientes, y se le proporciona aireación y algún sistema para la colección de lixiviados. Las biopilas se suelen cubrir con plástico con el objetivo de controlar los lixiviados, la evaporación y la volatilización de contaminantes, además de favorecer su calentamiento (Volke-Sepulveda, 2002).



Los sistemas de biopilas más utilizados se representan en la Figura 8, donde las **biopilas alargadas** representan el proceso de composteo más económico y sencillo, cuyo mecanismo de aireación se realiza a través de un mezclado manual o mecánico de la composta, evento que homogeniza la temperatura y se puede realizar una vez al día o inclusive una vez por mes. Por su parte, en las **biopilas estáticas** no hay un sistema de mezclado mecánico, ya que tanto la aireación como la homogenización de calor se llevan a cabo por un sistema de inyección (compresor) o extracción (vacío) de aire, cuyos vapores recuperados pueden ser tratados específicamente (Volke-Sepúlveda y Velasco, 2003).

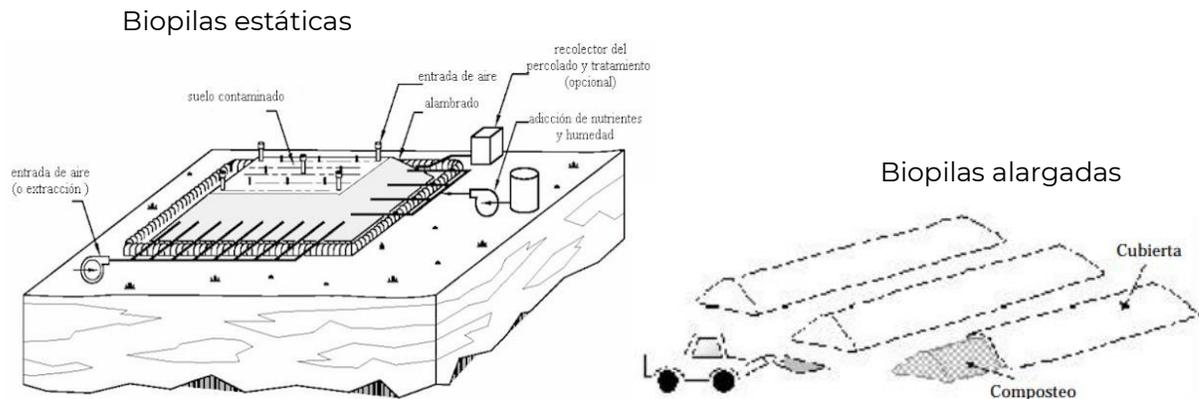


Figura 8. Esquema de un sistema de Biopilas.

Tomado de: EPA, 2006

A pesar de que esta estrategia de biorremediación brinda buenos resultados en los procesos de remediación de suelos, presenta algunas limitaciones como son:

- Requiere de contar con espacio para colocar el suelo retirado del sitio contaminado.
- Durante el proceso de traslado del suelo contaminado al sitio de tratamiento se pueden liberar compuestos orgánicos volátiles.
- Debido a la adición de agentes de volumen se incrementa la cantidad de material a tratar.



- Con esta estrategia no se pueden tratar metales pesados (Volke-Sepulveda, 2002).

Para esta estrategia de biorremediación los costos están en función de la cantidad de suelo a tratar, el tipo de contaminante, la necesidad de tratamientos previos y/o posteriores y la necesidad de equipos para el control de compuestos orgánicos volátiles. Los costos de esta estrategia oscilan entre 130 y 260 USD/m³ (Volke-Sepulveda, 2002).

El tiempo que suele tardar esta estrategia de remediación en limpiar un suelo contaminado va desde algunas semanas hasta varios meses.

3.2.4 Biolabranza

La biolabranza es una técnica simple en la cual el suelo contaminado es excavado y separado mecánicamente por tamizado. El suelo contaminado se coloca en capas de no más de 0.4 metros de espesor. A continuación, se utiliza una membrana sintética, de hormigón o de arcilla para cubrir la capa de suelo contaminada. Se añade oxígeno y la mezcla se produce mediante arado, trituración o molienda. Se pueden agregar nutrientes y se debe mantener cierta humedad para ayudar al proceso de remediación. El pH del suelo también se mantiene cerca de 7.0, usando piedra caliza triturada o cal agrícola (Figura 8) (Van Deuren y col., 2002). El objetivo es estimular a los microorganismos biodegradables autóctonos y facilitar la degradación aeróbica de los contaminantes.

Debido a que la biolabranza no resulta ser tan cara, pues los costos de monitoreo y mantenimiento, así como los pasivos de limpieza, son reducidos ha recibido mucha atención como una alternativa de biorremediación.

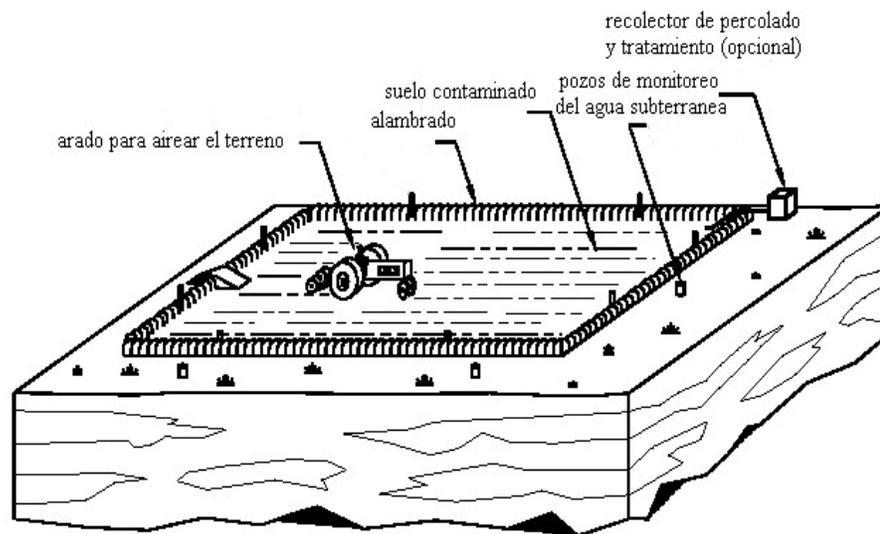


Figura 8. Esquema de un sistema de biolabranza.

Tomado de: EPA, 2006

Hemos revisado las estrategias de Biorremediación *in situ* y *ex situ*, y como te pudiste dar cuenta antes de elegir cualquier estrategia de biorremediación es necesario realizar una valoración de las condiciones del sitio contaminado, con lo que podremos visualizar si existe una posibilidad de aplicar un sistema de degradación biológica, el primer aspecto a evaluar es la población microbiana presente, donde si no hay crecimiento, entonces no se puede aplicar una técnica de biorremediación. Si hay crecimiento, se deberá analizar si hay biodisponibilidad con objeto de considerar la optimización de la degradación biológica. Si es factible la estrategia ideal a seguir es aplicar una técnica por remediación *in situ*, de lo contrario aplicar una *ex situ* (Figura 9).

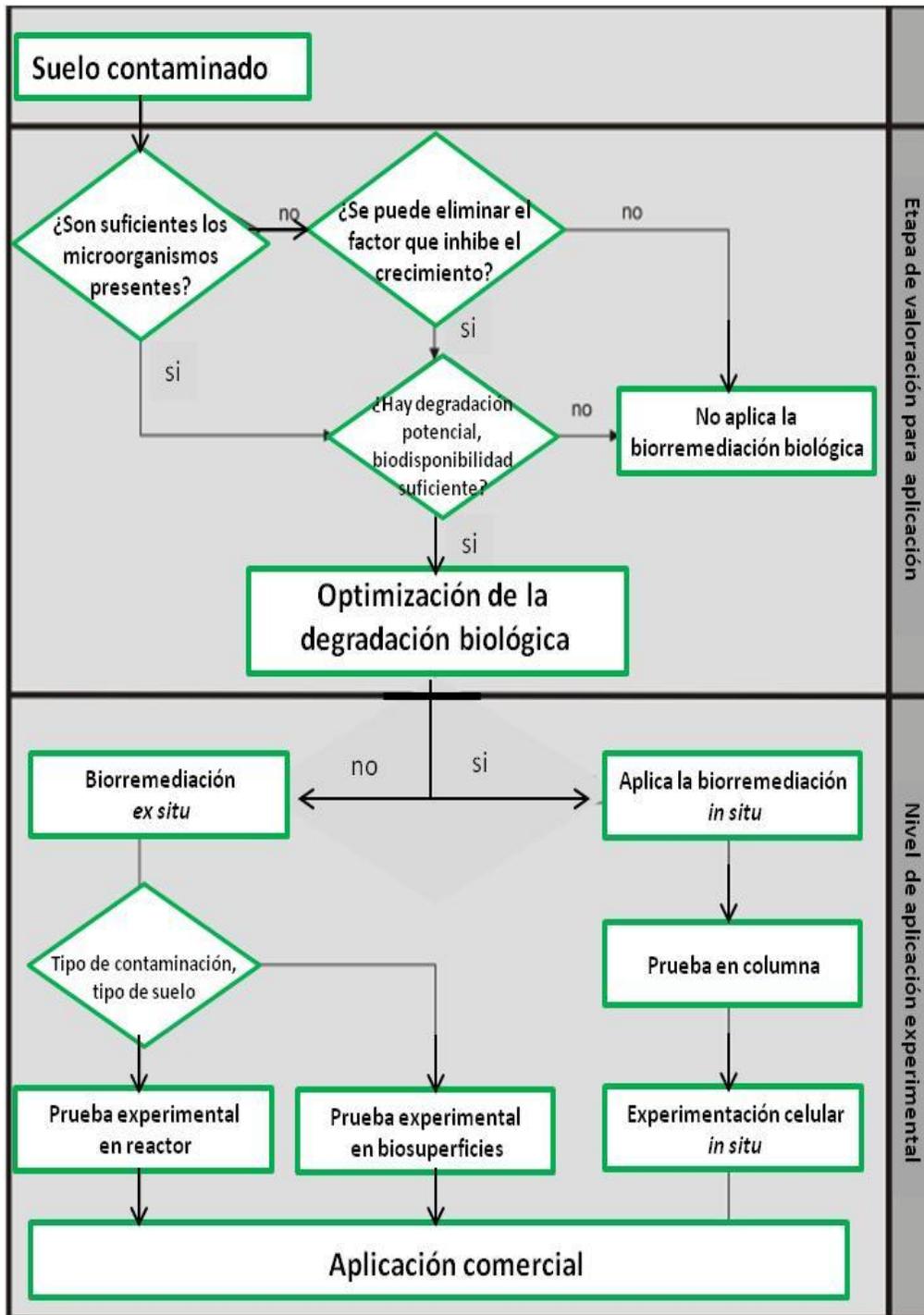


Figura 9. Diagrama secuencial para la determinación del tipo de biorremediación *in situ* o *ex situ* a utilizar en sitios contaminados.

Tomado de: International Centre for Soil and Contaminated Sites 2006.



3.3 Fitorremediación

La fitorremediación es una tecnología relativamente reciente, los estudios de investigación en esta área se han realizado en su mayoría durante las dos últimas décadas (1990 en adelante). La fitorremediación es una técnica estéticamente agradable, adecuada para la aplicación en sitios grandes donde otros métodos de remediación no son rentables o factibles (Garbisu y Alkorta, 2003). La fitorremediación tiene un bajo costo para su instalación y mantenimiento comparada con otras técnicas de remediación (Van Aken, 2009). Adicionalmente, el establecimiento de vegetación sobre suelos contaminados puede ayudar a prevenir la erosión (Chaudhry y col., 1998).

Fitorremediación

Es un proceso que utiliza plantas para remover, transferir, estabilizar, concentrar y/o destruir contaminantes (orgánicos e inorgánicos) en suelos, lodos y sedimentos, y puede aplicarse tanto *in situ* como *ex situ*.

(Volke-Sepulveda, 2002)

Esta es una técnica novedosa, económica, eficiente y amigable con el ambiente. Ya que las plantas generalmente manejan a los contaminantes sin afectar el suelo, conservando su utilidad y funcionalidad. Además, las plantas pueden aumentar la fertilidad del suelo con la aportación de materia orgánica (Mench y col., 2009). Las plantas tienen una enorme capacidad de absorber contaminantes del ambiente y llevar a cabo su detoxificación por diversos mecanismos.

La fitorremediación puede remover de manera eficiente la contaminación ocasionada por **compuestos orgánicos** como el benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX); **solventes y agroquímicos clorados**; **hidrocarburos aromáticos policíclicos, agroquímicos organofosforados**; además de compuestos inorgánicos como metales pesados (Cd, Cr(VI), Co, Cu, Pb, Ni, Se y Zn) (Volke-Sepulveda, 2002).



Para que la estrategia de fitorremediación tenga éxito, es necesario seleccionar adecuadamente las especies vegetales a utilizar. Una planta adecuada para fitorremediación debe poseer las siguientes características (Raskin y col., 1997):

- Capacidad para degradar contaminantes orgánicos y/o acumular metales,
- Tolerancia a los efectos tóxicos del contaminante
- Rápido crecimiento y grandes cantidades de biomasa
- Sistema radicular extenso, raíces profundas y ramificadas
- Buena adaptación a las condiciones ambientales y climáticas
- Resistencia a patógenos
- Fácil cultivo y cosecha
- Rechazo a herbívoros para evitar la entrada en la cadena alimenticia

Hasta ahorita solo hemos hablado de la definición, aplicaciones y de algunas ventajas de la fitorremediación. A continuación, revisaremos las estrategias de fitorremediación que se emplean.

3.3.1 Tipos de remediación mediante el empleo de plantas

Las estrategias de fitorremediación están basadas en los mecanismos fisiológicos básicos que tienen lugar en las plantas y en los microorganismos asociados a ellas, tales como: transpiración, fotosíntesis, metabolismo y nutrición (Tabla 3, Figura 10) (Delgadillo-López y col., 2011).



Tabla 3. Estrategias de fitorremediación.

Estrategia	Mecanismo	Contaminantes
Fitoestabilización	Complejación	Orgánicos e inorgánicos
Fitoextracción	Hiperacumulación	Inorgánicos
Fitovolatilización	Volatilización a través de las hojas	Orgánicos e inorgánicos
Fitoinmovilización	Acumulación en la rizosfera	Orgánicos e inorgánicos
Fitodegradación	Uso de plantas y microorganismos para degradar contaminantes	Orgánicos
Rizofiltración	Uso de raíces para absorber y adsorber contaminantes del agua	Orgánicos e inorgánicos

(Delgadillo-López y col., 2011)

De acuerdo al tipo de contaminante, las condiciones del sitio y el nivel de limpieza requerido; las estrategias de fitorremediación se pueden emplear como forma de contención (rizofiltración, fitoestabilización y fitoinmovilización) o eliminación (fitodegradación, fitoextracción y fitovolatilización) (Delgadillo-López y col., 2011). A continuación, revisaremos en que consiste cada estrategia de Fitorremediación.

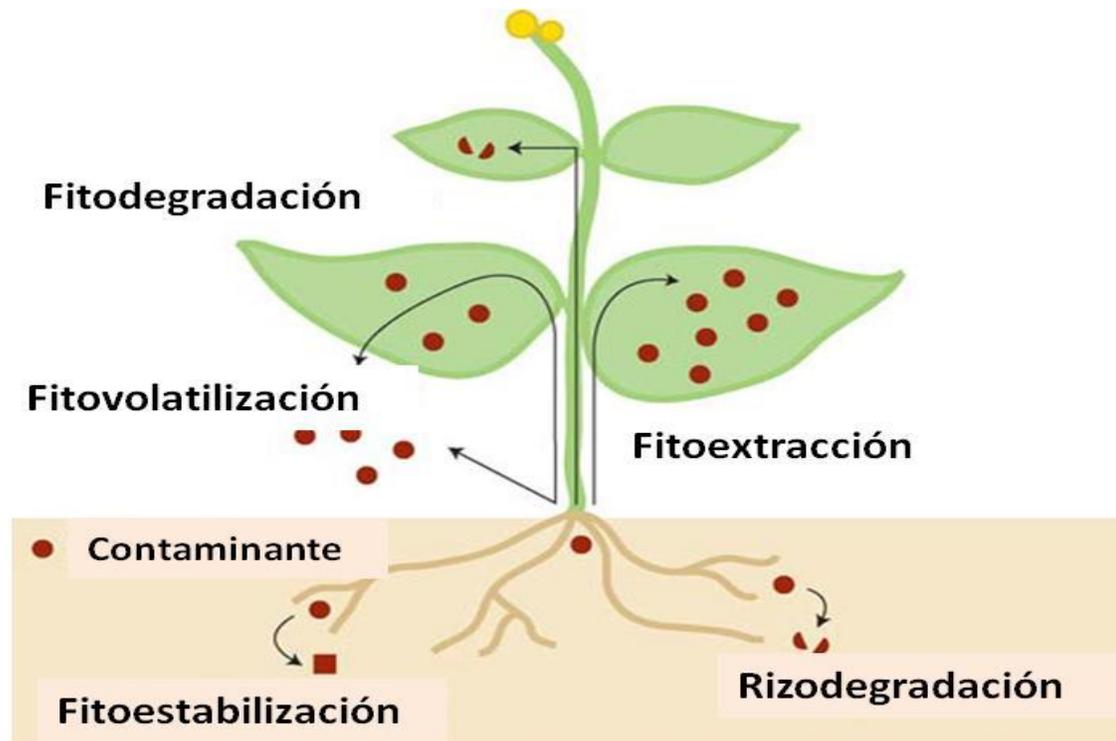


Figura 10. Posibles destinos de los contaminantes durante la fitorremediación, pueden ser estabilizados o degradados en la rizosfera, secuestrados o degradados dentro de la planta o volatilizadas.

Tomado de: Pilon-Smits, 2005.

Fitoextracción

La fitoextracción (también conocida como fitoacumulación, fitoabsorción o fitosequestración) se refiere a la acumulación y translocación, a través de las raíces, de metales pesados presentes en el suelo hacia diferentes partes cosechables de la planta, dando como resultado la limpieza permanente del sitio. Esta es la tecnología más estudiada entre todas las de este tipo (Tangahu y col., 2011).

Para la aplicación de la fitoextracción lo primero que hay que hacer es seleccionar la especie o especies de plantas más adecuadas para los metales presentes y las características del sitio contaminado. Una vez que las plantas han crecido estas se tienen que cortar y posteriormente incinerarlas y trasladar las cenizas a un sitio seguro. La fitoacumulación se puede repetir ilimitadamente hasta que la concentración remanente de metales en el suelo esté dentro de los límites considerados como aceptables. Algunas plantas empleadas para esta estrategia de



fitorremediación son: *Thlaspi caerulescens* (Cd); *Sedum alfredii*, *Viola baoshanensis* y *Vertiveria zizanioides* (Zn, Cd, Pb); *Alyssum murale*, *Trifolium nigriscens*, *Psychotria douarrei*, *Geissois pruinosa*, *Homalium guillainii*, *Hybanthus floribundus*, *Sebertia acuminata*, *Stackhousia tryonii*, *Pimelea leptospermoides*, *Aeollanthus biformifolius* y *Haumaniastrum robertii* (Ni); *Brassica juncea*, *Helianthus annuus*, *Sesbania drummondii* (Pb); *Brassica napus* (Cu, Pb, Zn); y *Pistia stratiotes* (Ag, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn) (Delgadillo-López y col., 2011).

Fitofiltración

La fitofiltración se refiere a la remoción de los contaminantes del agua o aguas residuales por plantas (Mukhopadhyay y Maiti, 2010). La fitofiltración se puede dividir en rizofiltración (uso de raíces) o blastofiltración (uso de plántulas) o caulofiltración. En la fitofiltración los contaminantes son absorbidos o adsorbidos y por lo tanto su disponibilidad hacia aguas subterráneas es minimizada.

En la rizofiltración las plantas se cultivan en un sistema hidropónico. Una vez que el sistema radicular está bien desarrollado, las plantas se introducen en el agua contaminada con metales pesados, en donde las raíces los absorben y acumulan. A medida que las raíces se van saturando, las plantas se cosechan y se disponen para su uso final. Algunas plantas acuáticas empleadas en la rizofiltración son: *Scirpus lacustris* (Cd, Cu, Pb, Mg, Fe, Se, Cr), *Lemna gibba* (Pb, As, Cu, Cd, Ni, Cr, Al, Fe, Zn, Mn), *Azolla caroliniana* (Hg, Cr Sr, Cu, Cd, Zn, Ni, Pb, Au, Pt), *Elatine trianda* (As), *Wolffia papulifera* (Cd), *Polygonum punctatum* (Cu, Cd, Pb, Se, As, Hg, Cr, Mn) y *Myriophyllum aquaticum*, *Ludwigina palustris* y *Mentha aquatic* (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni) (Delgadillo-López y col., 2011).

Fitoestabilización

La fitoestabilización o fitoinmovilización es el uso de ciertas plantas para la estabilización de contaminantes en suelos contaminados (Singh, 2012). Esta técnica es empleada para disminuir la movilidad y biodisponibilidad de contaminantes en el ambiente, evitando así su migración a aguas subterráneas o su entrada en la cadena alimenticia (Erakhrumen, 2007).

La fitoestabilización se ha empleado exitosamente en suelos de textura fina con alto contenido de materia orgánica. Se aplica principalmente en



terrenos extensos en donde existe contaminación superficial. Esta tecnología tiene como ventajas, sobre otros métodos de remediación de suelos, que es de menor costo, fácil de aplicar y estéticamente agradable. Algunas plantas empleadas con fines de fitoestabilización son: *Hyparrhenia hirta* (Pb); *Zygophyllum fabago* (Zn); *Lupinus albus* (Cd, As); *Anthyllis vulneraria* (Zn, Pb, Cd); *Deschampsia cespitosa* (Pb, Cd, Zn); *Cardaminopsis arenosa* (Cd, Zn); *Horedeum vulgare*, *Lupinus angustifolius* y *Secale cereale* (As); *Lolium italicum* y *Festuca arundinaceae* (Pb, Zn); y *Brassica juncea* (Cd, Zn, Cu, Mn, Fe, Pb) (Delgadillo-López y col., 2011).

Fitovolatilización

La fitovolatilización es la absorción de los contaminantes del suelo por las plantas, su conversión en formas volátiles y subsecuente liberación a la atmosfera. Esta técnica puede ser empleada para contaminantes orgánicos y algunos metales como el Hg y Se. Sin embargo, su uso es limitado por el hecho de que no remueven el contaminante completamente solo lo transfieren del suelo a la atmosfera (Padmavathiamma y Li, 2007).

A través, de la fitovolatilización se han eliminado contaminantes como: compuestos orgánicos volátiles (benceno, nitrobenceno, tolueno, etilbenceno y mxileno), As, Se y Hg. Las especies *Salicornia bigelovii*, *Brassica juncea*, *Astragalus bisulcatus* y *Chara canescens* se han empleado para la remediación de sitios contaminados con Se y *Arabidopsis thaliana* para el Hg (Delgadillo-López y col., 2011).

Fitodegradación

La fitodegradación es la degradación de los contaminantes orgánicos por las plantas a través de enzimas como deshalogenasas y oxígenasas. Las plantas pueden acumular contaminantes orgánicos de sitios contaminados y eliminarlos a través de sus actividades metabólicas. La fitodegradación está limitada solo a contaminantes orgánicos porque los metales no son biodegradables (Vishnoi y Srivastava, 2008).

La fitodegradación se ha empleado para la remoción de explosivos como el TNT, hidrocarburos halogenados, Bisfenol A, hidrocarburos aromáticos policíclicos y pesticidas organoclorados y organofosforados (Delgadillo-López y col., 2011).



Fitoimmobilización

La fitoimmobilización o fitoestabilización consiste en la disminución de la biodisponibilidad de los contaminantes mediante la producción de compuestos químicos en la interfaz suelo-raíz, los que inactivan las sustancias tóxicas, ya sea por procesos de absorción, adsorción o precipitación (Delgadillo-López y col., 2011).

3.3.2 Alcances de la fitorremediación

La fitorremediación es una estrategia de biorremediación que tiene como objetivo la eliminación de metales pesados y contaminantes orgánicos (en suelo, aire, agua y sedimentos), en algunos países como Estados Unidos, Argentina, Suecia, entre otros, las estrategias de fitorremediación son ampliamente utilizadas, sin embargo; en México la fitorremediación aún se encuentra en desarrollo por lo que resulta necesario realizar investigación sobre los procesos que determinan la disponibilidad de los contaminantes, su absorción, traslocación, quelación, degradación y volatilización en la planta, con el fin de transmitir a la sociedad este conocimiento para su aceptación y comercialización. En la medida en que el conocimiento sobre la fitorremediación se incrementa, será posible una aplicación más eficiente y a gran escala de esta tecnología (Delgado-López y col., 2011).

Cierre de Unidad

En esta Unidad lograste conocer las estrategias de biorremediación que existen, y analizar los procesos de biorremediación *in situ* y *ex situ*. Asimismo, lograste identificar en qué consiste el proceso de fitorremediación; todo esto con el fin de que en un futuro tengas la capacidad para desarrollar una estrategia de biorremediación, para recuperar ambientes alterados por contaminantes.



Para saber más



En este video se revisa la estrategia de Bioestimulación

<https://www.youtube.com/watch?v=pqfrwmWbIA>



Si te interesa conocer cómo puedes dar tratamiento a los residuos que se generan en casa, te invito a que revises el siguiente material:

SEMARNAT-INE-GTZ. (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología y Agencia de Cooperación Técnica Alemana). 2006. Manual de compostaje municipal. (consultado el 02 de abril 2014).

http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd68/comps_muni.pdf



Fuentes de consulta



- EPA. Engineering Issue. In situ and ex situ biodegradation technologies for remediation of contaminated sites (2006) EPA/625/r-06/015.
- International Centre for Soil and contaminated Sites. (2006). *Manual for biological remediation techniques*. Federal Environmental Agency. Dessau. pp. 81.
- Kumar, A., Bisht, B.S., Joshi, V.D. & Dhewa, T. (2011). *Review on bioremediation of Polluted Environmet: a management tool*. Int. J. Environ. Sci. 1(6), 1079-1093.
- Leung, M. (2004). *Bioremediation: Techniques for cleaning up a mess*. Biotech Journal Reviews & Readings. 2(1), 18-22.
- Mohee, R., & Mudhoo, A. (2012). *Bioremediation and sustainability: research and applications*. New Jersey: John Wiley and Sons (1st Edition), 431.
- Philp, J.C., Atlas, R.M. y Cunningham, C.J. (2001) *Bioremediation*. Encyclopedia of life sciences. John Wiley & Sons, Ltd.
- Schnoor, J.L. (2000) Degradation by Plants-Phytoremediation, *Biotechnology*, 11b, 372-384.
- Stryer, L., Berg, J. M. & Tymoczko J.L. (2003) *Bioquímica* 5ta Edición Reverté.
- U.S. environmental Protection Agency. (1998). *Undertanding bioremediation; A guidebook for citizens*. EPA/540/2-91/002. Research and Development. pp. 19.



- Van-Cauwenberghe, L. & Roote, D.S. (1998). *In situ bioremediation*. Ground-water remediation technologies analysis center. Pittsburgh. pp 24.
- Velasco, J. A., Volke Sepúlveda, T. L. (2003). El composteo: una alternativa tecnológica para la biorremediación de suelos en México. *Gaceta Ecológica*, 1(66), 41-53.