



**Universidad de El Salvador**  
*Hacia la libertad por la cultura*

DÍA MUNDIAL DEL MEDIO AMBIENTE

# BIOTECNOLOGIA Y BIORREMEDIACION

**JOSE ROBERTO ALEGRIA COTO**  
**[r Alegria@conacyt.gov.sv](mailto:r Alegria@conacyt.gov.sv)**

**Escuela de Biología, Facultad de  
Ciencias Naturales y Matemática**

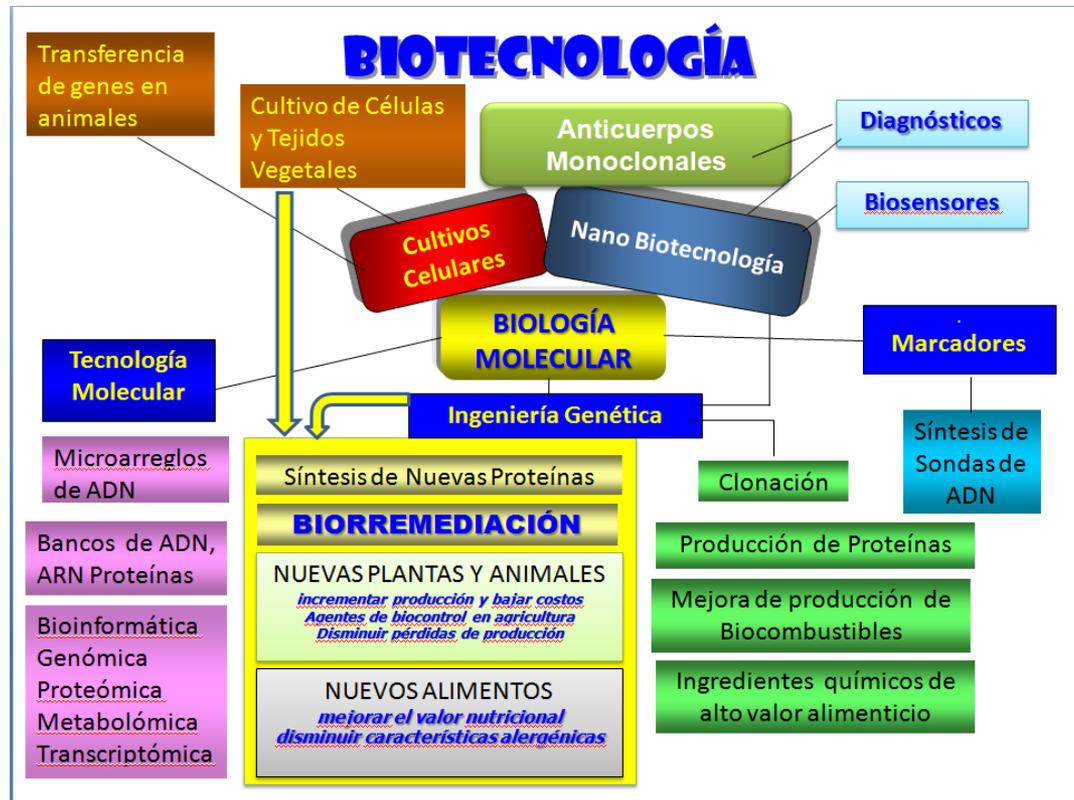
**5 de junio de 2013.  
9 a.m.**

# CONTENIDO

- INTRODUCCIÓN
- TECNOLOGÍAS DE BIORREMEDIACIÓN
- OTRAS POSIBILIDADES BIOTECNOLÓGICAS
- REFLEXIONES FINALES

# INTRODUCCIÓN

La **BIOTECNOLOGÍA** utiliza organismos vivos (o partes de organismos) para hacer o modificar productos, mejorar plantas o animales o desarrollar microorganismos para usos específicos".



La **BIODEGRADACIÓN** ocurre en la naturaleza, y la actuación humana transformo esos procesos naturales en **BIOTECNOLOGÍAS** para acelerar la tendencia natural.

# INTRODUCCIÓN

La **BIORREMEDIACIÓN** surgió como una rama de la biotecnología, a mediados del siglo XX con las primeras investigaciones para estudiar el potencial de los microorganismos para biodegradar contaminantes.

Las primeras técnicas de **BIORREMEDIACIÓN** que se aplicaron fueron hechas por compañías petrolíferas, similares a la actual **Biolabranza** (landfarming).

Las primeras patentes, para remediación de vertidos de gasolina, aparecen en los años **70**. En los años **80** se generalizó el uso de la **Bioventilación** para suministrar oxígeno a las zonas contaminadas. Durante los años **90** el desarrollo de las técnicas de **Bioburbujeo** (air sparging), se hizo posible la biorremediación en zonas por debajo del nivel freático.

Al mismo tiempo, la implementación en la práctica de aproximaciones experimentales en el laboratorio permitió el tratamiento de hidrocarburos clorados, los primeros intentos con metales pesados, el trabajo en ambientes anaerobios, etc. Paralelamente, se desarrollaron métodos de ingeniería que mejoraron los rendimientos de las técnicas más populares para suelos contaminados (**Biolabranza**, **Composteo**, etc.).

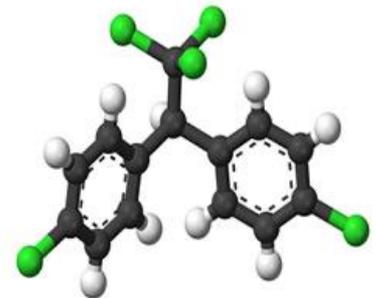
# INTRODUCCIÓN

La **BIORREMEDIACIÓN** se refiere a:

- i) cualquier proceso de recuperación medioambiental producido por el uso de microorganismos, hongos, plantas o enzimas derivadas de ellos (**Faircompanies**);
- ii) uso de procesos biológicos para la limpieza de la tierra y el agua, por lo general el agua subterránea contaminada **Cell**.

En los países en desarrollo, hay dos principales tipos de contaminación que amenazan la salud humana: **desechos orgánicos** y **metales pesados** (plomo, mercurio, cadmio).

La **BIORREMEDIACION** por ejemplo, se emplea en grupos de compuestos organoclorados, compuestos orgánicos no naturales que tienen cloro en su molécula (como el Diclora Difenil Tricloroetano - DDT), y son capaces de intervenir en los procesos celulares normales, entre otros la reproducción. Estos productos de la contaminación, también pueden incorporarse en la mayoría de los alimentos, como pollos, carnes rojas, pescados, productos lácteos, aceites vegetales y verduras.



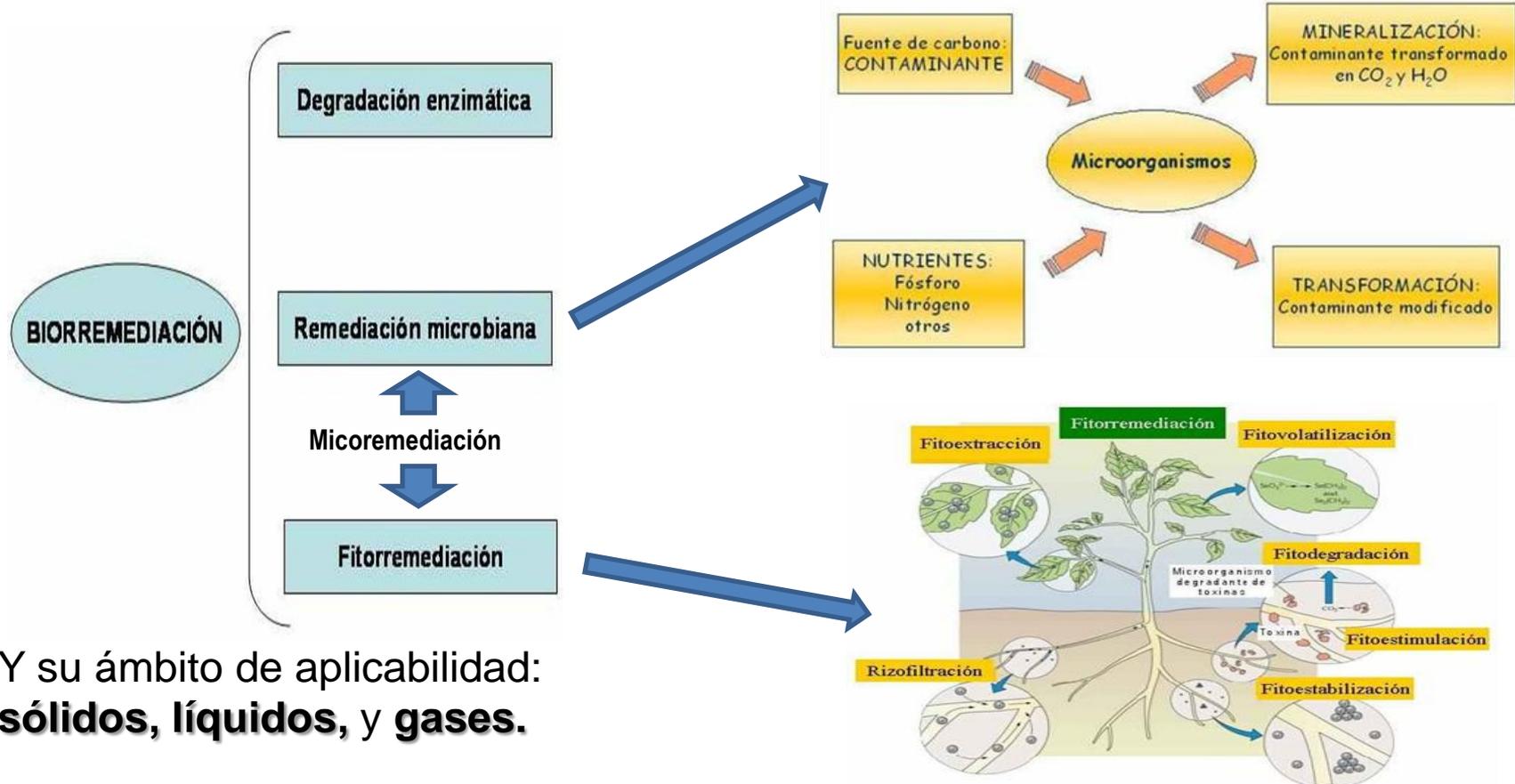
# INTRODUCCIÓN

| Ejemplos de aplicación de la biorremediación   |                                     |   |                                       |                          |                              |
|--|-------------------------------------|---|---------------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| Tipo de remediación  | Lugar                               | Contaminante  | Nivel de degradación                  | Duración del tratamiento | Autor                        |
| Adición de receptores de electrones (amonio y fosfatos)  |                                     | Aceite de refinería   | 50-70%                                | 300 días                 | Dott et al (1995)            |
| Adición de aceptores de electrones (perclorato de hierro [III], nitrato de hierro [III] y peróxido de hidrógeno) | Suelo contaminado artificialmente   | Diesel  | > 99 %                                | 1 hora                   | Watts y Dilly (1996)         |
| Adición de aceptores de electrones (sulfato de hierro [III] y percolato de hierro [II])                          | Suelo contaminado artificialmente   | Diesel  | 70-80 %                               | 1 hora                   | Watts y Dilly (1996)         |
| Bioaumentación con <i>Arthrobacter</i>   | Fábrica de herbicidas Arkansas, EUA | Pentaclorofenol   | Reducción de la vida media del tóxico | 15 horas                 | Finn (1983)                  |
| Bioaumentación con bacterias y aplicación de fertilizantes   | Exxon Valdez, Alaska                | Derrame de aceite contaminado con hidrocarburos polinucleares aromáticos y alifáticos | 60-90 %                               | 20 - 30 días             | Atlas (1995)                 |
| Bioaumentación con un cultivo mixto de bacterias   | NR                                  | Aceite de refinería   | NR                                    | 10 semanas               | Dott et al (1995)            |
| Bioreactores   | Fábricas de pesticidas              | Compuestos orgánicos clorados   | 20 - 90 %                             | 300 días                 | Dott et al (1995)            |
| Bioreactores con adición de <i>Pseudomonas</i>   | Fábrica de herbicidas Arkansas EUA. | Compuestos orgánicos clorados   | 100%                                  | 14 horas                 | Finn (1983)                  |
| Bioreactores, nivel laboratorio  | Fábrica de BPCs, Checoslovaquia     | BPCs  | 70 - 94 %                             | 22 días                  | Kastanek <i>et al</i> (1995) |
| Bioreactores, planta piloto  | Fábrica de BPCs, Checoslovaquia     | BPCs  | 75 - 85 %                             | 5 semanas                | Kastanek et al (1995)        |
| Reactor sólido/líquido inoculado con <i>P. Chryseosporium</i>  | Oregon, EUA                         | Hidrocarburos policlorados  | 83%                                   | 1 mes                    | Stroo <i>et al</i> (1989)    |
| Tratamientos de suelos   | Oregon, EUA                         | Pentaclorofenol y creotosa  | 80 - 99 %                             | 4 - 8 semanas            | Stroo <i>et al</i> (1989)    |

# INTRODUCCIÓN

La **BIORREMEDIACIÓN** puede realizarse *in situ* y *ex situ*. Son menos costosas *in situ*, puesto que involucran un número significativo menor de desplazamiento de materiales, pero también requieren de tratamiento más largos y menos control en comparación con las tecnologías *ex situ*.

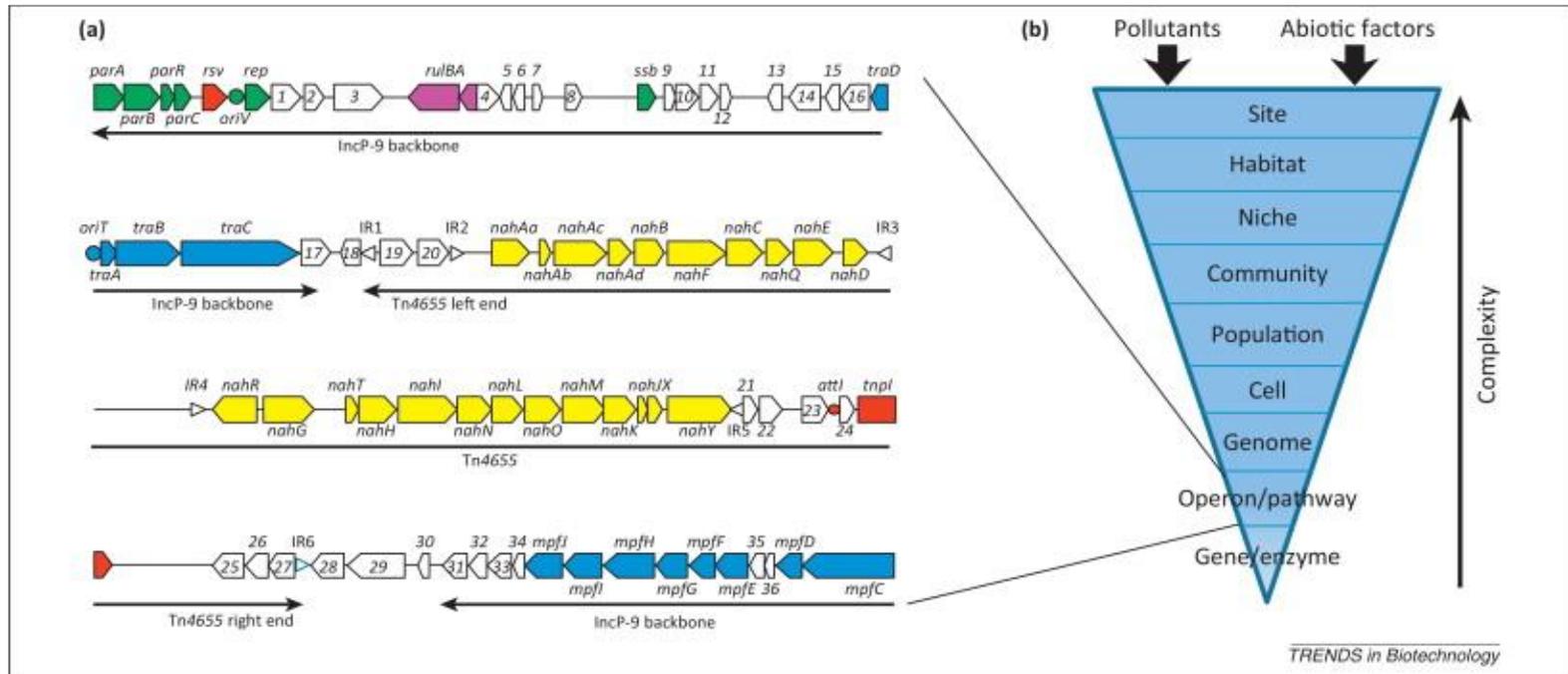
La biorremediación funciona a nivel: **sub-celular, unicelular o multicelular.**



Y su ámbito de aplicabilidad: **sólidos, líquidos, y gases.**

# INTRODUCCIÓN

La **BIORREMEDIACIÓN** debe distinguirse de la **BIODEGRADACIÓN**, en el sentido en que esta última ocurren las complejas interacciones que se dan en todos los niveles de un ecosistema. Mientras que generalmente en la Biorremediación se incide en uno de esos niveles.



Distinción de BIODEGRADACIÓN DE BIORREMEDIACIÓN. (a) plásmido NAH7 de *Pseudomonas putida* G7. Presenta los operones (superior e inferior), responsables de la biodegradación de naftaleno, un importante contaminante del medio ambiente. (b) Sin embargo, su función es en un solo nivel de complejidad, característico de la biorremediación a escala de campo.

# TECNOLOGÍAS DE BIORREMEDIACIÓN

• **BIOLABRANZA.** La superficie del suelo contaminado se trata en el mismo sitio por medio del arado. El suelo contaminado se mezcla con suelo limpio y nutrientes, y se remueve periódicamente para favorecer su aireación. Las condiciones del suelo (pH, temperatura, aireación) se controlan para optimizar la velocidad de degradación y generalmente se incorporan cubiertas u otros métodos para el control de lixiviados.



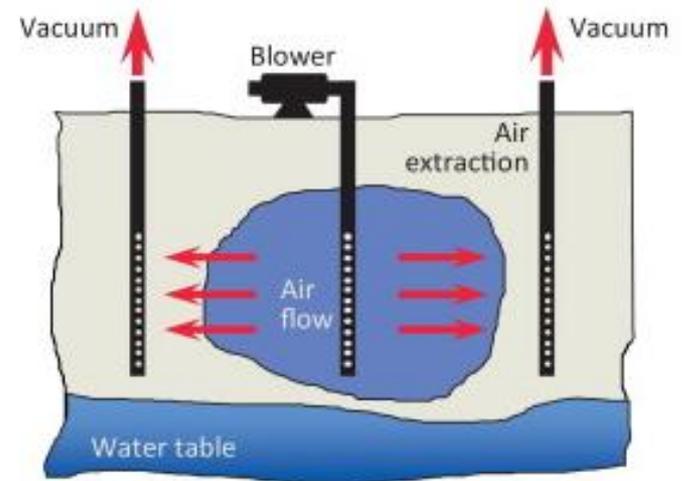
Los contaminantes tratados con éxito por biolabranza, incluyen diesel, gasolinas, lodos aceitosos, PCP, creosota y coque, además de algunos pesticidas. Es una tecnología de gran escala, que se practica en los Estados Unidos de América, Canadá, Reino Unido, Holanda, Suiza, Dinamarca, Francia y Nueva Zelanda.

Limitaciones. La biolabranza debe manejarse con cuidado para prevenir la contaminación de acuíferos, superficies de agua, aire o en la cadena alimenticia. El mayor problema es la posibilidad de lixiviados de los contaminantes hacia el suelo y el agua. Otra limitante para su utilización, es que por la incorporación de suelo contaminado en suelo limpio, se genera un gran volumen de material contaminado.

# TECNOLOGÍAS DE BIORREMEDIACIÓN

• **BIOVENTILACIÓN.** Es un proceso que utiliza una mayor oxigenación en la zona no saturada para acelerar la biodegradación de contaminantes. Se sirve de microorganismos para descomponer sustancias tóxicas que han sido absorbidas por el agua. El objetivo de esta práctica es estimular a las bacterias ya presentes en el área degradada, para así acelerar la biodegradación de los hidrocarburos y, si es necesario, añadir nutrientes para facilitar el crecimiento bacteriano.

El oxígeno es inducido a través de una inyección directa de aire en el lugar donde se ha producido la contaminación. Se emplea con éxito como asistencia para acelerar la degradación de **residuos de crudo**, aunque también para disipar **compuestos orgánicos volátiles** (VOC por sus siglas en inglés), **vapores o gases** presentes en combustibles fósiles, **disolventes y pinturas**.

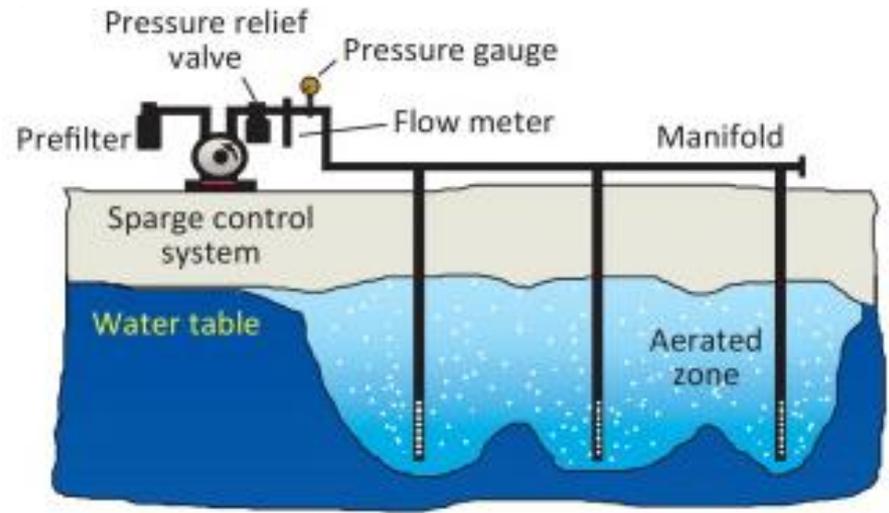


[Trends in Biotechnology](#)

Los VOC son liposolubles y afectan al sistema nervioso central. También pueden ser cancerígenos, como el benceno. De ahí la conveniencia y premura de reducir su presencia en zonas contaminadas.

# TECNOLOGÍAS DE BIORREMEDIACIÓN

• **BIOBURBUJEO**. Consiste en inyectar aire a presión en la parte inferior para desplazar el agua de los espacios intersticiales de la matriz del suelo. Esta inyección genera principalmente dos efectos: i) el aire inyectado absorbe gran cantidad de los hidrocarburos volátiles presentes en el agua y el suelo; ii) el aire eleva los niveles de oxígeno del agua mejorando la biodegradación de los contaminantes.



[Trends in Biotechnology](#)

Con la inyección de aire a presión se llevan a cabo dos mecanismos de remoción del contaminante, la **volatilización de compuestos de la zona insaturada** y la **fase acuosa y la biodegradación**. El mecanismo que dirige esos procesos depende de las características de los contaminantes.

# TECNOLOGÍAS DE BIORREMEDIACIÓN

• **COMPOSTEO (biorremediación en fase sólida).** Es un proceso biológico controlado, por el cual pueden tratarse **suelos y sedimentos contaminados con compuestos orgánicos biodegradables**, para obtener subproductos inocuos estables. El material contaminado se mezcla con agentes de volumen (paja, aserrín, estiércol, desechos agrícolas), que son sustancias orgánicas sólidas biodegradables, adicionadas para mejorar el balance de nutrientes, así como para asegurar una mejor aireación y la generación del calor durante el proceso.

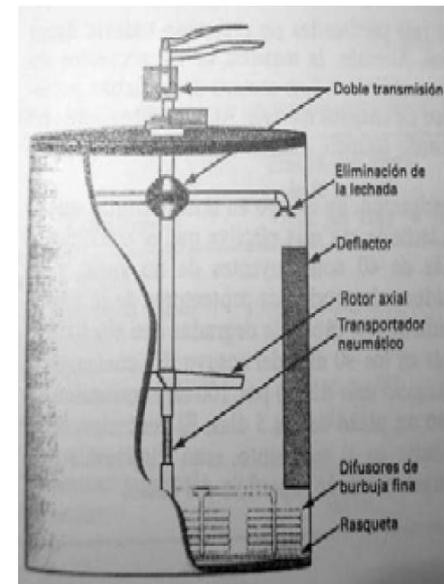
Aplicaciones. El composteo se ha usado con éxito para remediar suelos contaminados con clorofenoles (**PCP**), **gasolinas**, hidrocarburos aromáticos policíclicos (**HAP**), hidrocarburos del petróleo (**HTP**). Se ha demostrado también la reducción, hasta niveles aceptables, en la concentración y toxicidad de explosivos (**TNT**). El uso de estrategias de composteo, se ha adoptado seriamente hasta los últimos tres a cinco años.

Limitaciones. Algunas limitaciones del proceso son: (i) necesidad de espacio; (ii) necesidad de excavar el suelo contaminado, lo que puede provocar la liberación de COV; (iii) incremento volumétrico del material a tratar y (iv) no pueden tratarse metales pesados.

# TECNOLOGÍAS DE BIORREMEDIACIÓN

• **BIORREACTOR (biorremediación en fase de lodo)**. Es un sistema de descomposición biológica que permite el crecimiento controlado de microorganismos, aplicado a escala industrial. En sentido estricto, son meros recipientes que mantienen un ambiente biológicamente activo, como un compostador doméstico o una cuba en la que fermenta un vino o un licor.

Su interior ha sido diseñado para facilitar y aumentar el efecto de procesos químicos generados por microorganismos en contacto con sustancias químicas, a través de procesos aeróbicos (ecosistemas controlados en los que el oxígeno está presente) o anaeróbicos (sin oxígeno). Los sólidos son mezclados con nutrientes y mantenidos en suspensión en el biorreactor; puede añadirse ácido o base para ajustar el pH; o añadirse microorganismos si no hay una población adecuada.



Son utilizados para convertir aguas negras y grises o productos de explotaciones agropecuarias en fertilizante biológico.

# TECNOLOGÍAS DE BIORREMEDIACIÓN

• **FITORREMEDIACIÓN.** Se refiere al tratamiento de problemas ambientales mediante el uso de plantas, un proceso más sencillo y mucho menos costoso que modalidades tradicionales, como excavar el material contaminante y depositarlo en un lugar controlado. Asimismo, como el resto de modalidades de biorremediación, se evita el impacto ecológico de la maquinaria y el transporte de las sustancias peligrosas, que además deben ser almacenadas y no desaparecen. Se emplean plantas con la habilidad de absorber y degradar o eliminar pesticidas, solventes, explosivos, hidrocarburos y sus derivados, así como otras sustancias tóxicas tales como restos de metales pesados (<http://faircompanies.com/news/view/biorremediacion-10-metodos-recuperacion-ecologica/> )

La Fuerza Aérea de EE.UU. ha utilizado álamos para contener tricloroetileno (TCE) en el agua subterránea. En Iowa, EPA demuestra que los **árboles de álamo** actuaban como bombas naturales para mantener herbicidas tóxicos, pesticidas y fertilizantes fuera de los arroyos y aguas subterráneas (Fggardens).

Tanto los residuos nucleares y el plomo se pueden limpiar con **plantas de la familia de la col.** Una vez plantadas, estos vegetales absorben los metales y, finalmente, los depositan en las células de las hojas o en los brotes. **NO COMA LAS PLANTAS UTILIZADAS PARA FITORREMEDIACIÓN** (Fggardens).

# TECNOLOGÍAS DE BIORREMEDIACIÓN

**FITORREMEDIACIÓN:** Tipos de fitorremediación, en donde se indica la zona de la planta en donde ocurre el proceso.

| <b>Tipo</b>               | <b>Proceso Involucrado</b>   | <b>Contaminación Tratada</b>   |
|---------------------------|--|--|
| <b>Fitoextracción</b>     | Las plantas se usan para concentrar metales en las partes cosechables (hojas y raíces)   | Cadmio, cobalto, cromo, níquel, mercurio, plomo, plomo selenio, zinc   |
| <b>Rizofiltración</b>     | Las raíces de las plantas se usan para absorber, precipitar y concentrar metales pesados a partir de efluentes líquidos contaminados y degradar compuestos orgánicos | Cadmio, cobalto, cromo, níquel, mercurio, plomo, plomo selenio, zinc isótopos radioactivos, compuestos fenólicos                           |
| <b>Fitoestabilización</b> | Las plantas tolerantes a metales se usan para reducir la movilidad de los mismos y evitar el pasaje a napas subterráneas o al aire.                                  | Lagunas de deshecho de yacimientos mineros. Propuesto para fenólicos y compuestos clorados.  |
| <b>Fitoestimulación</b>   | Se usan los exudados radiculares para promover el desarrollo de microorganismos degradativos (bacterias y hongos)  | Hidrocarburos derivados del petróleo y poliaromáticos, benceno, tolueno, atrazina, etc   |
| <b>Fitovolatilización</b> | Las plantas captan y modifican metales pesados o compuestos orgánicos y los liberan a la atmósfera con la transpiración.   | Mercurio, selenio y solventes clorados (tetraclorometano y triclorometano)   |
| <b>Fitodegradación</b>    | Las plantas acuáticas y terrestres captan, almacenan y degradan compuestos orgánicos para dar subproductos menos tóxicos o no tóxicos.                               | Municiones (TNT, DNT, RDX, nitrobenzono, nitrotolueno), atrazina, solventes clorados, DDT, pesticidas fosfatados, fenoles y nitrilos, etc. |

# TECNOLOGÍAS DE BIORREMEDIACIÓN

## EJEMPLOS DE HIPERACUMULACIÓN DE DIFERENTES METALES EN PLANTAS

### A. Nickel

|   |               |
|---|---------------|
| <i>Berkheya codii</i> (Asteraceae)      | 11,600        |
| <i>Pentacalia spp.</i> (Asteraceae)     | 16,600        |
| <i>Senecia spp.</i> (Asteraceae)        | 11,000        |
| <i>Alyssium spp.</i> (Brassicaceae)     | 1280-29,400   |
| <i>Bornmuellera spp.</i> (Brassicaceae) | 11,400-31,200 |
| <i>Thlaspi spp.</i> (Brassicaceae)      | 2000-31,000   |
| <i>Psychotria coronata</i> (Rubiaceae)  | 25,540        |

### B. Zinc

|  |        |
|--|--------|
| <i>Thlaspicarulescence</i> (Brassicaceae)      | 43,710 |
| <i>Thlaspi rotundifolium</i> (Brassicaceae)    | 18,500 |
| <i>Dichopetalum gelonioides</i> (Brassicaceae) | 30,000 |

### C. Cadmium

|  |       |
|--|-------|
| <i>Thlaspi caerulescens</i> (Brassicaceae) | 2,130 |
|--|-------|

### D. Lead

|  |        |
|--|--------|
| <i>Minuartia verna</i> (Caryophyllaceae) | 20,000 |
| <i>Agrostis tenuis</i> (Poaceae)         | 13,490 |
| <i>Festuca ovina</i> (Poaceae)           | 1,750  |

### E. Cobalt

|   |        |
|---|--------|
| <i>Haumaniastrum robertii</i> (Lamiaceae) | 10,232 |
| <i>Aeollanthus subacaulis</i> (Lamiaceae) | 4,300  |
| <i>Crotolaria cobalticola</i> (Fabaceae)  | 30,100 |

### F. Copper

|  |        |
|--|--------|
| <i>Ipomoea alpina</i> (Convolvulaceae) | 12,300 |
| <i>Aeollanthus subacaulis</i>          | 13,700 |

### G. Manganese

|  |        |
|--|--------|
| <i>Maystenus bureaviana</i> (Celastraceae) | 19,230 |
| <i>Maystenus sebertiana</i> (Celastraceae) | 22,500 |
| <i>Macadania Neurophylla</i> (Proteaceae)  | 55,200 |

### H. Selenium

|   |          |
|---|----------|
| <i>Astragalus racemosus</i> (Leguminosae) | 1,49,200 |
| <i>Lecithis ollaria</i> (Lecithidiaceae)  | 18,200   |



**Environmental bioremediation technologies**

editado por Shree N. Singh, R. Rudra D. Tripathi

 **Springer**

Páginas mostradas con permiso de Springer. Página de créditos.

# TECNOLOGÍAS DE BIORREMEDIACIÓN

## PLANTAS FITORREMEDIADORAS DE ELEMENTOS QUÍMICOS

| ELEMENTO QUÍMICO | PLANTAS FITORREMEDIADORAS   |
|------------------|---|
| Aluminio         | hortensia, cebada, goldenrod peludo, horsebean  |
| Arsénico         | girasol, grama común, helecho chino, crown pink, violet crown-cup, violet star cup          |
| Benceno          | árbol de caucho, kalanchoe, geranio, spider plant   |
| Cromo            | lenteja de agua, helecho de agua, colza, girasol, hydrilla, alfalfa, lechuga de agua        |
| Cobre            | hisopo de agua, jacinto de agua, girasol, lenteja de agua, lechuga de agua                  |
| Mercurio         | hisopo de agua, tomillo, colza, jacinto de agua, hydrilla, lechuga de agua, mimbre          |
| Plomo            | col, brócoli, colza, jacinto de agua, girasol, lenteja de agua, mimbre, helechos acuáticos  |
| Cadmio           | jacinto de agua, mostazas, crucíferas, cáñamo, girasol, lenteja de agua, mimbre             |
| Zinc             | jacinto de agua, mostazas, brócoli, col, mostaza india, colza, girasol, mimbre, trébol rojo |
| Cesio            | jacinto de agua, mostaza, crucíferas, remolacha, quinua, palma de coco, girasol, maíz       |
| Estroncio-90     | jacinto de agua, mostazas, remolacha, quinua, girasol, zanahoria o el perejil, judías       |
| Uranio           | jacinto de agua, amaranto, familia de la col, girasol, junipero, roble, mimbre, maíz        |

Modificado de <http://www.sfggardens.com/>

Enlaces para obtener una lista completa de las plantas y lo que limpian:

[http://www.ndsu.edu/pubweb/famulari\\_research/commonSearch.php?plant\\_letter=A](http://www.ndsu.edu/pubweb/famulari_research/commonSearch.php?plant_letter=A)

<http://www.ars.usda.gov/is/ar/archive/jun00/soil0600.htm>

[http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_hyperaccumulators](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_hyperaccumulators)

[http://www.ndsu.edu/pubweb/famulari\\_research/commonSearch.php?plant\\_letter=A](http://www.ndsu.edu/pubweb/famulari_research/commonSearch.php?plant_letter=A)

<http://www.cpeo.org/techtree/ttdescript/phytrem.htm>

# TECNOLOGÍAS DE BIORREMEDIACIÓN

• **MICORREMEDIACIÓN.** Es una forma de biorremediación en la que se emplean hongos para descontaminar un área, a través del uso de micelios (cuerpo vegetativo del hongo).

Alethia Vázquez-Morillas, de la UAM de Ciudad de México, sostiene que es posible acelerar el proceso de descomposición de los pañales desechables en vertederos, empleando el hongo *Pleurotus ostreatus* (champiñón ostra) en un proceso que descompone el 90% del material de los pañales convencionales usados, y en cuatro meses, se han desvanecido por completo. En donde, el cultivo tan poco convencional proporciona setas totalmente seguras para el consumo humano.



Debido a su capacidad para descomponer materia orgánica, los micelios pueden ser empleados para **transformar hidrocarburos** e incluso **gases nerviosos** (como el **VX** y el **sarín**) en fertilizante orgánico, de un modo económico.

# TECNOLOGÍAS DE BIORREMEDIACIÓN

- **BIOLIXIVIACIÓN**, denominada lixiviación bacteriana, consiste en el ataque químico de distintos materiales por bacterias, es posible extraer metales específicos de los minerales en que están encastados, es un método con mucho menos impacto que la lixiviación tradicional, en la que se emplea cianuro, especialmente tóxico para la vida.

La biolixiviación gana terreno entre las técnicas de minería más prometedoras para el futuro, debido a su menor impacto ecológico y a la ausencia de contaminación del suelo.

La **biohidrometalurgia**, práctica minera que engloba a la biolixiviación, se usa para obtener cobre, zin, arsénico, antimonio, níquel, molibdeno, oro, plata y cobalto. El *Thiobacillus ferrooxidans* se aplica en minas de cobre, uranio y oro.



# TECNOLOGÍAS DE BIORREMEDIACIÓN

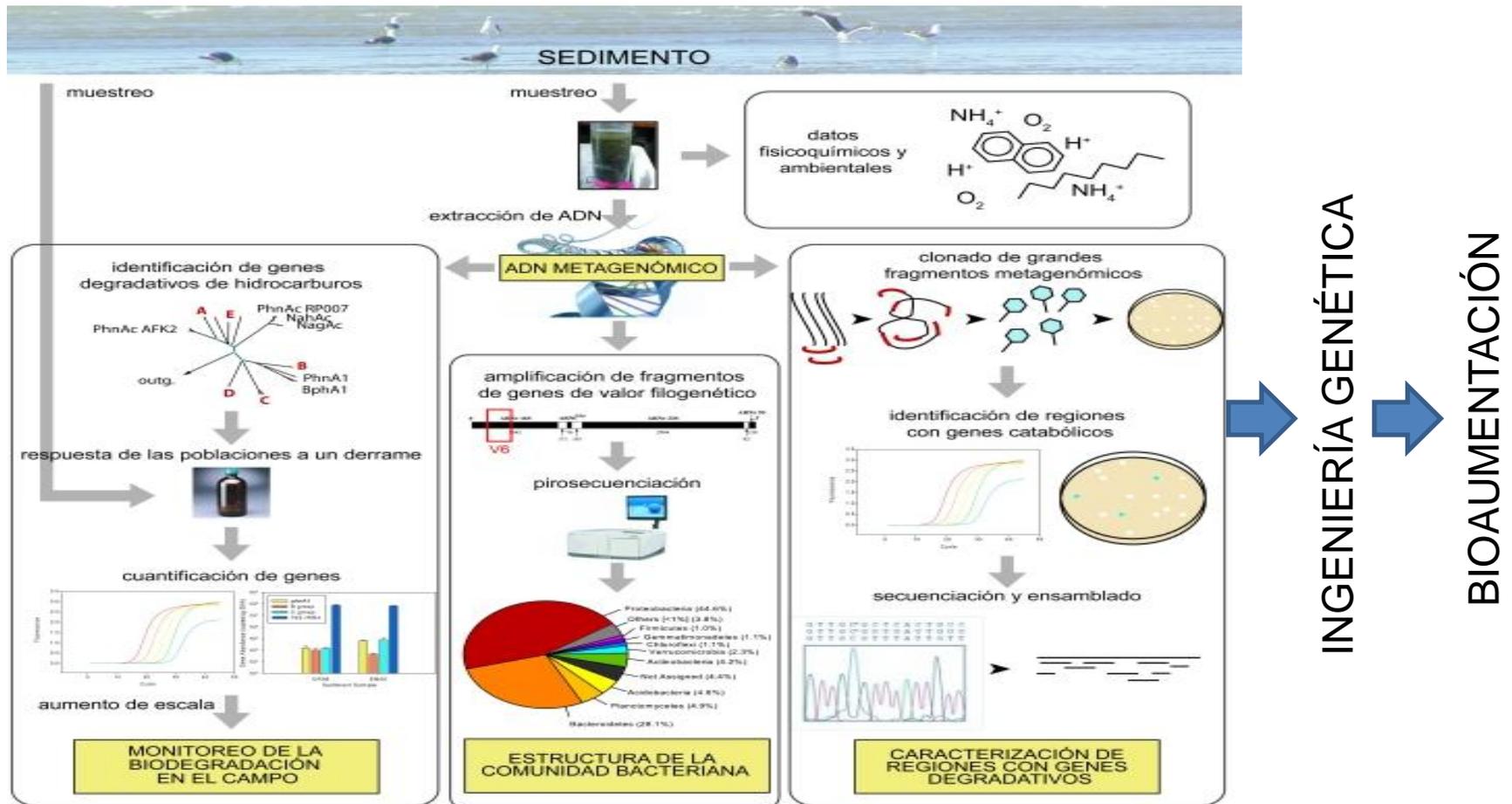
- **BIOESTIMULACIÓN.** Modifica el entorno para estimular las bacterias "biorremediadoras" existentes en el medio -aquellas con capacidad para restaurar un entorno con elevada toxicidad-.

Se emplean distintas técnicas para modificar el entorno a restaurar, entre ellos la **inyección de nutrientes** que se pierden con la contaminación y que estimulan el crecimiento de los microorganismos responsables de la restauración, y en algunos casos **biodesinfectantes** para que los microorganismos presentes hagan su trabajo. Esto puede combinarse con el **desarrollo de consorcios de microorganismos endógenos** que son introducidos en el sitio contaminado para regenerar las condiciones de normales.

Es un método conocido y efectivo para tratar aguas y subsuelo que han padecido vertidos de hidrocarburos.

# TECNOLOGÍAS DE BIORREMEDIACIÓN

- **BIOAUMENTACIÓN.** Se inoculan cepas microbianas genéticamente modificadas y con mayor capacidad para restaurar entornos con alta concentración tóxica.



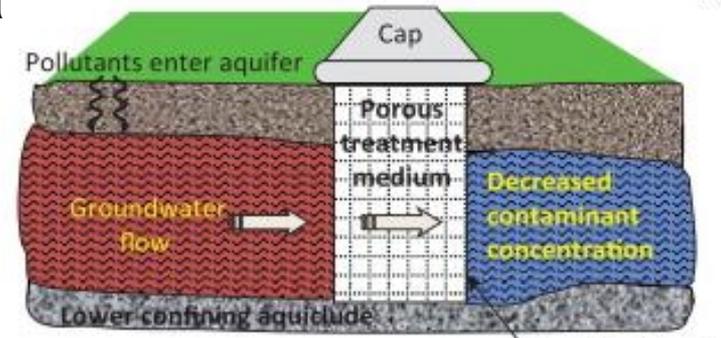
# TECNOLOGÍAS DE BIORREMEDIACIÓN

## INVESTIGACIONES CON OGMs

- **Volatilización del mercurio en forma gaseosa no tóxica** en álamo amarillo (*Liriodendro tulipifera*), se introdujo el gen *merA*, que codifica para la enzima *reductasa del ion mercúrico*, altamente tóxico, que cataliza su reducción hasta la forma volátil y poco tóxica de mercurio elemental, gaseoso en condiciones de temperatura no muy elevadas.
- **Fitovolatilización de mercurio (Hg)** por medio de plantas transgénicas (*Arabidopsis thaliana*) que fueron transformadas con dos genes provenientes de microorganismos que pueden transformar el mercurio iónico en mercurio más estable.
- **Detoxificación de TNT y GTN** en suelos de campos minados por plantas transgénicas de tabaco (*Nicotiana tabacum*) con genes provenientes de bacterias.
- **Acumulación de cadmio, arsénico y mercurio** por plantas transgénicas de *Arabidopsis thaliana* que toleran su acumulación.
- **Cianobacterias transgénicas** con genes de bacterias *Pseudomonas* con capacidad de degradar diferentes hidrocarburos o pesticidas.

# TECNOLOGÍAS DE BIORREMEDIACIÓN

• **BARRERA BIORREACTIVA.** La barrera reactiva permeable (PRB) es una tecnología de técnicas físico-químicas para la remediación de aguas subterráneas contaminadas. Se instala a través de la trayectoria de flujo del agua subterránea, y se construye a partir de materiales porosos, para que el agua pueda pasar a través de la pared, con relleno de elementos metálicos cerivalentes (como hierro) para la degradación mediante óxido-reducción de **disolventes clorados**, **metales traza** y **radioactivos**, **nitratos** y **sulfatos**; con carbón activado, zeolitas o arcillas, para la adsorción de contaminantes; con calcita para la precipitación de **fósforo** en medios eutrofizados o **plomo**.



Un pequeño salto de la imaginación, entonces, ha dado lugar a los intentos de creación de **BARRERAS BIOREACTIVAS PERMEABLES**.

Consisten en una trinchera rellena con materiales que estimulan la actividad biológica de los microorganismos (mezclas de nutrientes y sustratos) con el objetivo de degradar compuestos orgánicos tóxicos.

# OTRAS POSIBILIDADES BIOTECNOLÓGICAS

- **TECNOLOGÍAS DE MODIFICACIÓN GENÉTICA (GM)** se han utilizado en muchas ocasiones para tratar de mejorar la velocidad de biodegradación de los contaminantes orgánicos particularmente recalcitrantes. Sin embargo, la biorremediación de sitios contaminados por su complejidad va mucho más allá de la biodegradación y no se presta a los enfoques típicamente reduccionistas (por ejemplo, un compuesto, una cepa, o una vía) que han llegado a dominar los estudios de biodegradación.

El principal problema encontrado en el éxito de la tecnología de biorremediación utilizando bacterias GM se refiere a las condiciones de campo hostiles para su supervivencia. Por lo tanto, en los casos específicos en los que agentes GM de biorremediación puede estar justificada, a pesar de la posibilidad de que puedan obtener beneficios ambientales y ayudar a difundir algo de la angustia política en torno a la utilización de GM, el hecho es que **se sabe poco sobre su eficacia en la limpieza en situaciones reales.**

# OTRAS POSIBILIDADES BIOTECNOLÓGICAS

• **TECNOLOGÍAS-ECOGENÓMICAS.** Las tecnologías de todo el genoma (ÓMICAS), **BIOSENSORES** y **TÉCNICAS DE PERFILES DE LA COMUNIDAD**, están disponibles, y podrían actuar como tecnologías habilitadoras, para mejorar la biorremediación en el campo. Los enfoques Ecogenomics podrían ser utilizados para caracterizar los sitios contaminados y supervisar el proceso de biorremediación; especialmente aquellos sitios con contaminantes recalcitrantes y numerosos.

La biodisponibilidad basada en bioluminiscencia de **Biosensores** son nuevas herramientas para la evaluación de sitios contaminados (por ejemplo, **biosensores de toxicidad** para reducir el costo de las investigaciones del sitio y para monitorear el progreso de remediación, y **biosensores de detección de contaminantes**). Esta tecnología de biosensores no ha conseguido la aprobación regulatoria generalizada.

Las técnicas de **Perfiles de la Comunidad** se han aplicado a la biorremediación (por ejemplo), pero de nuevo, la aceptación reglamentaria es una barrera. Lo que falta es una "señal reguladora" que da la confianza reguladora, de la manera que un análisis químico que muestra los contaminantes específicos que desaparecen durante el proceso que la remediación hace.

# OTRAS POSIBILIDADES BIOTECNOLÓGICAS

**METAGENÓMICA.** Su alto rendimiento evita el cultivo y da la secuencia completa del genoma de una muestra de suelo o agua contaminada. Se ha sabido desde hace décadas que la, población microbiana viable, no cultivable de suelo, es inmensa. Por lo tanto, el conocimiento del potencial catabólico de un sitio, es prácticamente desconocida usando técnicas de cultivo.

Esta tecnología puede ir mucho más allá de simplemente identificar cuáles microbios y genes catabólicos están presentes en una muestra. Por ejemplo, podría dilucidar el umbral de los contaminantes que pueden ser detectados por los microbios para inducir la expresión de sus vías catabólicas. La **metagenómica o metatranscriptómica** pueden llegar a predecir, con más confianza, los niveles finales de los contaminantes después de los tratamientos de biorremediación, con lo que se produciría un nivel de estandarización de la biorremediación que se carece en la actualidad.

El objetivo final es la combinación de estas técnicas **ecogenomics** con **herramientas de software** para que el conocimiento de la biodegradación se pueda traducir en la biorremediación y hechos químicos de poder predictivo, lo que a su vez mejorará la confianza de otras partes interesadas.

# OTRAS POSIBILIDADES BIOTECNOLÓGICAS

La **NANOTECNOLOGÍA** es un campo emergente que cubre un amplio rango de tecnologías las cuales están presentes en el desarrollo de la nanoescala. Esta tiene un rol principal en el surgimiento de métodos innovadores para producir nuevos productos, para sustituir equipo de producción existente y para reformular nuevos químicos y materiales con funciones mejoradas, que resultan en menos consumo de materiales y energía, y menor peligro para el medioambiente, así como su utilización en remediación ambiental. Aunque, la reducción de materiales y energía, beneficia al medioambiente, la nanotecnología tiene posibilidades para remediar problemas asociados con los procesos productivos existentes de una manera más sostenible. Las aplicaciones medioambientales de la nanotecnología se dirigen a la búsqueda de soluciones para los existentes problemas medioambientales, medidas preventivas para los futuros problemas resultantes de las interacciones de materiales y energía con el medioambiente, y posibles riesgos que puedan ser poseídos por la misma nanotecnología (Annual Review of Nano Research, Vol. 2, Chap. 2, 2008).

La NANOTECNOLOGÍA se refiere a la producción de objetos en la escala nano, que está comprendida entre 1 y 100 nm. Un nm es igual a una mil millonésima de metro ( $10^{-9}$ m).

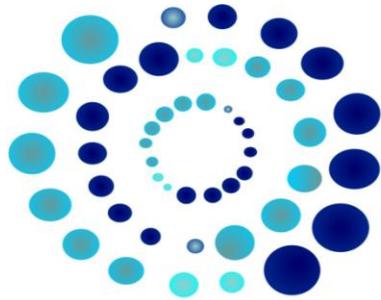
## CONTAMINANTES REMEDIADOS POR NANOTECNOLOGÍA DE HIERRO

|                      |                      |                              |
|----------------------|----------------------|------------------------------|
| Carbon tetrachloride | Chrysoidine          | <i>cis</i> -Dichloroethene   |
| Chloroform           | Tropaeolin           | <i>trans</i> -Dichloroethene |
| Dichloromethane      | Acid Orange          | 1,1-Dichloroethene           |
| Chloromethane        | Acid Red             | Vinyl Chloride               |
| Hexachlorobenzene    | Mercury              | PCBs                         |
| Pentachlorobenzene   | Nickel               | Dioxins                      |
| Tetrachlorobenzenes  | Silver               | Pentachlorophenol            |
| Trichlorobenzenes    | Cadmium              | NDMA                         |
| Dichlorobenzenes     | Bromoform            | TNT                          |
| Chlorobenzene        | Dibromochloromethane | Dichromate                   |
| DDT                  | Dichlorobromomethane | Arsenic                      |
| Lindane              | Tetrachloroethene    | Perchlorate                  |
| Orange II            | Trichloroethene      | Nitrate                      |

# REFLEXIONES FINALES

- la mayor contribución al medio ambiente debe ser la de **NO CONTAMINARLO**, antes que **BIORREMEDIA**R; por lo que se debe incentivar la **INNOVACIÓN DE PROCESOS** de producción menos contaminantes.
- La investigación en **BIORREMEDIACIÓN** debe hacerse de manera transdisciplinaria\* y tener en cuenta el potencial de las diferentes **BIOTECNOLOGÍAS**.
- La **NANOTECNOLOGÍA** es un campo emergente que aumentará su capacidad tecnológica en la resolución de la problemática de la contaminación ambiental.
- Hay que sentar las bases académicas para que los investigadores que se formen, tengan en cuenta que la tendencia tecnológica actual, se dirige hacia la sistematización de los procesos de **BIORREMEDIACIÓN**, mediante la convergencia de la **NANOTECNOLOGÍA**, la **BIOTECNOLOGÍA** y las **TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LA COMUNICACIÓN**.

\* Coordinación de todas las disciplinas e interdisciplinas hacia un objetivo común.



**N • CONACYT**  
CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA  
VICEMINISTERIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Ministerio de Educación



**¡MUCHAS GRACIAS  
POR SU ATENCIÓN!**

**Atentamente:**  
*José Roberto Alegria Coto*

