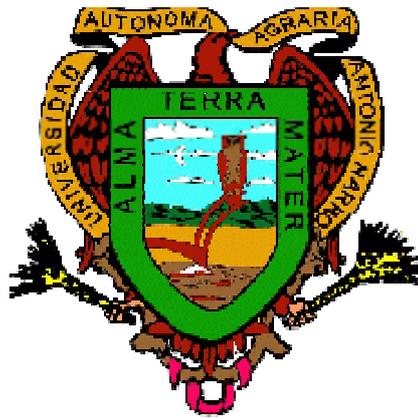


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA  
“ANTONIO NARRO”**

**UNIDAD LAGUNA**

**DIVISIÓN DE CARRERAS AGONÓMICAS**



**USO DE LA BIORREMEDIACION EN AGUAS MEXICANAS  
CONTAMINADAS POR AGUAS RESIDUALES.**

**POR:**

**ELSA LORENA HERRERA PONCE**

**MONOGRAFÍA**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA  
OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES**

**TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO**

**ABRIL DEL 2007**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA “ANTONIO NARRO”  
UNIDAD LAGUNA**

**DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS**

**USO DE LA BIORREMEDIACION EN AGUAS MEXICANAS  
CONTAMINADAS POR AGUAS RESIDUALES.**

**PRESENTADA POR:**

**ELSA LORENA HERRERA PONCE**

**MONOGRAFÍA QUE SE SOMETE A CONSIDERACIÓN DEL COMITÉ  
ASESOR, COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES**

**ASESOR PRINCIPAL:**

\_\_\_\_\_  
**ING. RUBI MUNOZ SOTO**

**CO-ASESOR:**

\_\_\_\_\_  
**Dr. JOSÉ LUIS REYES CARRILLO**

**ASESOR:**

\_\_\_\_\_  
**MC. HUGO AGUILAR MARQUÉZ**

**ASESOR:**

\_\_\_\_\_  
**MC. ALFREDO OGAZ**

\_\_\_\_\_  
**MC. VÍCTOR MARTÍNEZ CUETO**

**COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS**

**TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO**

**ABRIL DEL 2007**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA “ANTONIO NARRO”  
UNIDAD LAGUNA**

**DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS**

**MONOGRAFÍA QUE PRESENTA LA C. ELSA LORENA HERRERA PONCE Y  
QUE SE SOMETE A CONSIDERACIÓN DEL H. JURADO EXAMINADOR,  
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES**

**APROVADA POR:**

**PRESIDENTE DEL JURADO:**

\_\_\_\_\_  
**ING. RUBI MUNOZ SOTO**

**CO-ASESOR:**

\_\_\_\_\_  
**Dr. JOSÉ LUIS REYES CARRILLO**

**VOCAL:**

\_\_\_\_\_  
**MC. HUGO AGUILAR MARQUÉZ**

**VOCAL SUPLENTE:**

\_\_\_\_\_  
**MC. ALFREDO OGAZ**

\_\_\_\_\_  
**MC. VÍCTOR MARTÍNEZ CUETO**

**COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS**

**TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO**

**ABRIL DEL 200**

## **DEDICATORIAS**

### **A MI MADRE**

**Maria de los Ángeles Ponce Ruiz. Quien a pesar de todos los momentos difíciles, ha estado conmigo ya que Gracias a ella he podido salir adelante a su apoyo moral, económico y al gran amor que me tiene.**

### **A MI ABUE**

**Maria del Rosario Ruiz R. Por su apoyo incondicional, ya que siempre ha estado pendiente de mi y de mi niño, por ayudarme en todo lo que ha podido para poder terminar esta carrera por todo su cariño mil Gracias.**

### **A MI ESPOSO**

**Leobardo Aguilar Flores. Me faltan palabras para agradecerte a ti y a tu Familia todo lo que me han dado, gracias por estar a mi lado y por quererme tanto.**

### **A MIS HERMANOS**

**Angélica Yazmín Herrera Ponce, Israel Unzueta Ponce. Por que siempre los llevo en mi corazón, espero y este paso mas en mi vida les de aliento para seguir adelante, gracias por todos los momentos juntos.**

### **A MI HIJO**

**Carlos Eduardo Aguilar Herrera. El es y será mi motivo para seguir esforzándome para cumplir todas mis metas, por haber llegado a mi vida y ocupar mi corazón.**

### **A MIS AMIGOS**

**Poly Rocha. Te agradezco todos los momentos que me has brindado tu apoyo tu compañía tu cariño tu amistad.**

**Patty Ávila. Por que a pesar de la distancia es la amistad que más he conservado por q eres incondicional se que siempre estas ahí gracias por permitirme crecer con tu cariño.**

**Cynthia Mejia. Las distancias nos han separado un poco, pero aun así siempre te recuerdo como una gran compañera y gran amiga gracias por tu confianza y sinceridad.**

## **AGRADECIMIENTOS**

### **A DIOS**

**Por que sin su voluntad nada de esto seria realidad gracias por darme la vida y darme la dicha de tener una gran familia.**

### **A MI “ALMA TERRA MATER”**

**Por permitirme formar parte de su institución por darme los instrumentos necesarios para llegas a ser un Ingeniero.**

### **A LOS DOCENTES**

**Que de alguna manera fueron parte este equipo por su tiempo y dedicación para cada uno de nosotros y nuestra formación.**

### **A DR. JOSE LUIS REYES C.**

**Por su paciencia y comprensión ya que con su asesoramiento fue posible este trabajo.**

### **A ING. RUBI MUÑOZ SOTO.**

**Por su dispocision y pleno interés a la conclusión de este trabajo.**

### **A M.C. HUGO AGUILAR.**

**Por su contribución y estímulo en este trabajo de titilación.**

### **A M.C. ALFREDO OGAZ.**

**Por su valiosa participación y buena voluntad en esta investigación.**

## INDICE DE CONTENIDO

	<b>Página</b>
<b>INDICE DE CUADROS Y FIGURAS</b>	II
<b>RESUMEN</b>	1
<b>1. JUSTIFICACION</b>	2
<b>2. OBJETIVOS GENERALES</b>	3
<b>3. INTRODUCCION</b>	3
<b>4. ANTECEDENTES</b>	4
<b>5. AGUAS RESIDUALES</b>	5
<b>6. PROPIEDADES DE LAS AGUAS RESIDUALES</b>	5
6.1 Propiedades Físicas.	6
6.2 Propiedades Químicas.	6
6.3 Propiedades biológicas.	9
6.3.1 Vegetales.	9
6.3.2 Animales.	9
6.3.3 Mohos.	10
6.3.4 Bacterias.	10
6.3.5 Bacterias parásitas.	11
6.3.6 Bacterias saprofitas.	11
6.3.7 Bacterias anaerobias.	11
6.3.8 Bacterias facultativas.	11
6.3.9 Bacterias autótrofas.	11
6.4 Bacterias nitrificantes.	12
6.4.1 Tiobacterias.	12
6.4.2 Bacterias oxidantes del hidrógeno.	12

6.4.3 Virus.	13
<b>7. PROCESOS COMUNES DE TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES</b>	14
<b>8. MÉTODOS DE TRATAMIENTO MÁS UTILIZADOS</b>	15
8.1 Lagunas de estabilización.	15
8.2 Clasificación de las lagunas de estabilización.	16
<b>9. DAÑOS PRODUCIDOS POR CONTAMINACIÓN DE AGUAS</b>	19
<b>10. PRINCIPALES FUENTES GENERADORAS EN MEXICO.</b>	21
<b>11. BIORREMEDIACION</b>	21
11.1 Tipos de biorremediación.	22
11.2 Degradación enzimática.	22
11.3 Remediación microbiana.	23
11.4 Remediación con plantas (fitorremediación).	24
<b>12. LIMITACIONES DE LA BIORREMEDIACION</b>	28
12.1 Potencial de la biorremediación.	29
12.2 Desventajas de la biorremediación.	30
12.3 Riesgos de la biorremediación.	30
<b>13. USO DE ORGANISMOS MODIFICADOS GENÉTICAMENTE EN BIORREMEDIACIÓN</b>	31
13.1 Nuevos desarrollos biotecnológicos en plantas y bacterias.	32
13.2 Biotecnología y medio ambiente.	33
13.3 Características de las tecnologías de biorremediación.	34
13.4 Aplicación de tecnologías de biorremediación en México.	35
<b>14. RECOMENDACIONES PARA UN PROYECTOS DE BIORREMEDIACIÓN</b>	37

<b>15. BIOSOLIDOS</b>	38
15.1 Generación, composición de biosólidos.	39
15.2 Alternativas de disposición de biosólidos.	40
15.3 Efectos de los biosólidos sobre las propiedades del suelo y agua.	41
15.4 Efectos de biosólidos sobre vegetación.	42
<b>16. ASPECTOS NORMATIVOS</b>	44
16.1 Limitaciones y prácticas de manejo recomendadas.	44
<b>17. LA BIOTECNOLOGÍA COMO MEDIO PARA PREVENIR LA CONTAMINACIÓN</b>	45
<b>18. TÉCNICAS PARA PREVENIR LA CONTAMINACIÓN</b>	46
18.1 Reciclado.	47
<b>CONCLUSIÓN</b>	48
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	49

## INDICE DE CUADROS Y FIGURAS

### Página

<b>Cuadro 1.</b> Características químicas del agua residual.	7
<b>Cuadro 2.</b> Principales enfermedades con origen en al agua.	20
<b>Cuadro 3.</b> Principales plantas que actúan en la fitorremediacion.	26
<b>FIG 1.</b> Diferentes modos de biorremediación.	25
<b>FIG. 2.</b> Tipos de fitorremediación, en donde se indica la zona de la planta en donde ocurre el proceso.	22

## RESUMEN

El desarrollo de México, como el de muchos otros países, ha estado ligado al uso, manejo y preservación del agua. Con el paso de los años, el crecimiento de la población, los servicios y la industria han renovado la demanda del vital líquido. El estudio del agua en la naturaleza, su ubicación geográfica, el efecto de la acción del ser humano en los sistemas hidrológicos, así como el respeto ecológico que merece son elementos primordiales para planificar una explotación y conservación adecuadas. La biorremediación ha surgido recientemente como una alternativa tecnológica para la limpieza de suelos y acuíferos contaminados, donde se aprovecha el potencial de los microorganismos para mineralizar o transformar contaminantes orgánicos en compuestos químicamente más sencillos.

El proceso obedece a la capacidad metabólica de los microorganismos, los cuales se seleccionan de manera natural en presencia de contaminantes y la actividad biodegradadora puede ser estimulada por adición de nutrientes básicos. Entre las opciones que existen para la limpieza de sitios contaminados, la biorremediación es la mejor opción desde los puntos de vista ambiental y económico, sin embargo, no puede ser aplicada a todos los casos.

## 1. JUSTIFICACION

El aumento de la población y el desarrollo industrial sin precedentes alcanzados durante el siglo XX han elevado la presencia de contaminantes sólidos y líquidos convencionales a niveles críticos. La consecuencia ha sido la aparición de problemas de contaminación que antes se desconocían y para los cuales la sociedad no estaba preparada (Rivas y Sans, 1996).

Los diversos medios informativos y televisivos frecuentemente informan de derrames de petróleo por rotura de colectores, colisiones entre buques tanque y esporádicos incidentes industriales, la relevancia del tema es sutil, dado que se estima que el mas generalizado problema de contaminación de este tipo esta constituido por perdida sistemática de combustible originadas en el deterioro de tanques de almacenamiento o depósitos subterráneos, la disposición inadecuada de lubricantes de motores es otra fuente de contaminación extendida así como las grandes producciones de basura genera diariamente por la civilización que por diversas causas llega a diversos mantos acuíferos. De magnitud menor pero de inexorable relevancia están involucrados solventes, pesticidas e hidrocarburos derivados (Irwin *et al.*, 2002).

Pero hoy día se conoce que las aguas naturales se han ido degradando por diversas circunstancias y a la vez hay una mayor concientización, presión ambiental y legislativa, que están provocando la necesidad de construir plantas de tratamiento con objeto de extraer los contaminantes (Rivas y Sans, 1996).

Considerando que la biorremediación se perfila como la opción ambiental mas amigable del siglo XXI, para dar una respuesta efectiva para la restauración de muchos sitio contaminados (Irwin *et al.*, 2002; Fortúbel e Ibáñez, 2000; Randy *et al.*, 1999).

Tecnologías como el proceso de incineración, la desorción térmica, extracción con vapor o la vitrificación resultan demasiado costosas o ecológicamente incompatibles para considerarse como una solución viable (Fortúbel e ibáñez, 2000).

## 2. Objetivos generales

- Recopilar información que sirva de referencia para definir la problemática de la generación de aguas residuales.
- Identificar las alternativas existentes en tratamientos de aguas contaminadas.
- Determinar el potencial de la biorremediación en medios impactados por aguas residuales.

## 3. INTRODUCCION

Las fábricas y otras instalaciones industriales vierten una gran variedad de contaminantes a las corrientes de agua, los lagos y los océanos, además grandes cantidades de desechos industriales y urbanos se vierten al mar de manera ilegal. Los contaminantes industriales más comunes son: metales pesados como el plomo, el mercurio, el zinc y el selenio, residuos de tratamientos de minerales, partículas de arcilla, compuestos orgánicos, como el petróleo, derivados y gran cantidad de compuestos químicos inorgánicos., Los ríos, lagos y los océanos, han sido objeto de contaminación por una gran cantidad de sustancias. Las mas importantes son las aguas residuales domesticas, los fertilizantes agrícolas, los pesticidas y los residuos industriales (Irwin *et al.*, 2002).

La contaminación del agua no solamente daña la flora y la fauna acuáticas., también puede tener graves consecuencias en la salud y el sustento de la población. Millones de personas en todo el mundo, especialmente de los países menos desarrollados, están obligadas a utilizar pozos y corrientes de agua contaminada para beber, cocinar y lavar. Las aguas residuales y otros contaminantes producen enfermedades y la muerte de muchos seres vivos (Salud ambiental, 2000)En nuestras sociedades el petróleo y sus derivados son imprescindibles como fuente de energía y para la fabricación de múltiples productos de la industria química, farmacéutica, alimenticia, etc. (Moctezuma-Barragàn *et al.*, 2002).

Comúnmente, las aguas residuales no tratadas o parcialmente tratadas se vierten en los ríos y los océanos. El rápido crecimiento de las áreas urbanas aumenta de manera importante la cantidad de aguas residuales (Irwin *et al.*, 2002; Espinosa, 1997).

#### **4. ANTECEDENTES**

La utilización de los procesos biológicos en el tratamiento de los residuos orgánicos no es nuevo, un ejemplo es el uso de sistemas rústicos como la fosa séptica para el control de contaminación y los riesgos sanitarios asociados.

Posteriormente el desarrollo de nuevos procesos empíricos tal como el de lodos activados. Sin embargo a mediados del presente siglo las bases teóricas comenzaron a ser planteadas, al utilizar en fermentación y crecimiento bacteriano (Aguilar *et al.*, 1994).

Se han aplicado diversas técnicas, con variado índice de éxito para contrarrestar el efecto de la contaminación por hidrocarburos. Sin embargo, no se elaboró una guía que permitiese analizar la eficacia, costos, así como las ventajas y desventajas en general de la aplicación de dichas técnicas en México (Randy *et al.*, 1999).

El tratamiento de aguas residuales es más común en países desarrollados, pero los ríos se encuentran a menudo contaminados con una mezcla de vertidos industriales, desechos minerales y residuos agrícolas y urbanos. Estos problemas afectan de manera creciente las naciones recientemente industrializadas, en las cuales las medidas de control de la contaminación son todavía poco eficaces o no existen (Aguilar *et al.*, 1994).

Una de las prácticas más comunes que se ha realizado en el pasado, consiste en la utilización de encapsuladores para estabilizar presas de crudo. Estos productos absorben el hidrocarburo y lo retienen en su estructura interna. Pero la mayoría de los encapsuladores no contienen algún componente que lleve a cabo la biodegradación con el fin de descomponer el petróleo encapsulado. (UNE, 1996).

## **5. AGUAS RESIDUALES**

Llamamos aguas residuales a las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos público urbano, domestico, industrial, comercial, de servicios, agrícola, pecuario, de las plantas de tratamiento y en general de cualquier uso, así como la mezcla de ellas (Espinoza, 1997; Mata-Gonzalez, 1999; Howar, 2004).

En las aguas residuales crudas los sólidos sedimentables se convierten en lodos después del tratamiento preeliminar siendo orgánicos e inorgánicos. En los procesos biológicos de crecimiento en suspensión los lodos producidos contienen gran cantidad de sólidos biológicos (Jurado-Guerra, 2001).

El objetivo de un tratamiento, es reducir la carga de contaminantes del vertido y convertirlo en inocuo para el medio ambiente, para estos fines se usan distintos tratamientos dependiendo del contaminante que arrastren el agua y otros factores (Jurado-Guerra, 2001; Randy *et al.*, 1999).

## **6. PROPIEDADES DE LAS AGUAS RESIDUALES**

El agua tiene varias propiedades debidas a la presencia de enlaces químicos débiles entre los átomos de oxígeno y los átomos de hidrógeno de moléculas adyacentes (Howar, 2004).

### **6.1 Propiedades Físicas.**

Estas propiedades son adquiridas en su mayor parte, según sea el contenido total de sólidos en sus diferentes variantes de materiales flotantes, sustancias coloidales y productos disueltos.

Los sólidos pueden plantear problemas cuando las aguas residuales son tratadas mediante sistemas agrarios, debido a su capacidad de ocluir los poros del suelo y de poder llegar a establecer costras impermeables sobre la superficie de los terrenos.

El color de los efluentes urbanos produce ciertos efectos sobre las aguas de aplicación cuando se siguen sistemas agrarios de tratamiento de las aguas residuales. Generalmente, la coloración es indicadora de la concentración y composición de las aguas contaminadas, y puede variar del gris al negro. En la medida que éste es más intenso, la capacidad de absorción de energía solar es mayor, y ello redundaría en una ligera elevación de la temperatura del suelo. La temperatura de los efluentes urbanos no plantea graves problemas, ya que oscila entre 10 y 20 °C; facilita así el desarrollo de una fauna bacteriana y una flora autóctona, ejerciendo una acción amortiguadora frente a la temperatura ambiente, tanto en verano como en invierno, y en cualquier tipo de tratamiento biológico (Howar, 2004).

El olor causado por la descomposición anaerobia de la materia orgánica es debido, sobre todo, a la presencia de ácido sulfhídrico, indol, escatoles, mercaptanos y otras sustancias volátiles, y es eliminado por aireación o por aspersión del agua en los diferentes sistemas biológicos que se están tratando (Walter *et al.*, 2002).

## **6.2 Propiedades Químicas.**

Las propiedades químicas del agua tienen gran importancia debido a que interactúan con las del suelo, variando el valor de cada parámetro. Esto nos obliga a considerar que las modificaciones a provocar en el agua residual tienen que poseer un sentido de equilibrio que evite, en cualquier forma, que un componente se convierta en factor limitante del crecimiento del sistema natural que queremos aplicar (Fresquez, 1990).

Las propiedades químicas de las aguas residuales son proporcionadas por componentes que podemos agrupar en tres categorías, según su naturaleza: Materia orgánica, compuestos inorgánicos y componentes gaseosos, conjunto que podemos reunir, a su vez, en dos grandes grupos:

- Sólidos en suspensión
- Compuestos en disolución

<b>Características</b>	<b>Concentración (en mg/l)</b>
Conductividad	1792
Sólidos totales	1590
MES	1150
Coniformes	63 x 10 <sup>7</sup>
DBO	220
DQO	500
NH <sub>3</sub>	0.2
P <sub>04</sub>	23
Cl	182
S <sub>04</sub>	147
Dureza total	483
Alcalinidad (total)	433
Ph	7.7
Hg	0.0015
Cd	0.027
Zn	0.54
Cu	0.09
Ni	0.1
Fe	2.4
Mn	0.17
Na	308
K	50
Pb	0.09

Cuadro 1.0 características químicas del agua residual (Figueroa *et al.*, 2002).

Ya hemos tratado ampliamente de los problemas que causa la materia orgánica. Esta, tanto en disolución como en suspensión, presenta una composición más o menos homogénea, en la que se encuentran, en forma predominante, las proteínas, los hidratos de carbono y algunos aceites y grasas. En esta distribución no podemos olvidar los compuestos citados como fenoles, plaguicidas, etc. Si la distribución de esta materia orgánica es importante respecto a las características organolépticas del agua y algunas propiedades físicas, como la densidad y turbidez, o químicas como el pH., generalmente no hay correlación entre la concentración y el efecto. De este modo, podemos comprender que a bajas concentraciones de un determinado compuesto orgánico, pueden manifestarse toxicidades en un suelo si se aplican sistemas de vertidos agrarios (Health, 2002).

Existen elementos, como el nitrógeno, que se encuentran bajo diferentes formas: El nitrógeno orgánico puede aparecer como amonio, en los nitratos orgánicos y en los nitritos, siendo las dos primeras formas mayoritarias. La presencia de nitratos es muy importante cuando se aplican sistemas de vertidos a suelos y cuando aparecen en concentraciones elevadas en la parte superficial de los suelos (Mata-Gonzales, 1999).

Un elemento integrado en los compuestos orgánicos de los efluentes, y de gran importancia, es el fósforo, que pasa rápidamente a fosfato. Los elementos pesados y los elementos traza son, en algunos casos, esenciales para el desarrollo y el crecimiento de las plantas y microorganismos de los sistemas biológicos de tratamiento de aguas. Sin embargo, a determinados niveles estos elementos esenciales se pueden convertir en tóxicos (Walter *et al.*, 2002).

El zinc, el cobre y el níquel son los metales que más contribuyen a acrecentar las cifras de elementos pesados, siendo el zinc el metal usado como referencia de toxicidad. El boro es otro elemento que puede afectar mucho a los sistemas biológicos de tratamiento de aguas. Es esencial en la micro nutrición vegetal, pero puede ser tóxico para muchos sistemas de fauna y flora que están presentes en los procesos de tratamiento de las aguas residuales (Jurado-Guerra, 2001., Walter *et al.*, 2002).

### **6.3 Propiedades biológicas.**

El componente biológico es básico en las aguas residuales, habida cuenta de su capacidad metabólica y en consecuencia, de su potencialidad de transformación de los restos químicos, orgánicos y físicos.

Existe la presencia de fauna y flora en las aguas residuales, tales como bacterias, actinomicetos, hongos y algas, y hemos hablado de la fauna que compone las pirámides de detritívoros que sirven para conseguir reciclar determinados elementos que son fundamentales para los sistemas biológicos de tratamiento de las aguas residuales (Howar, 2004).

Las aguas residuales contienen gran número de organismos vivos que son los que mantienen la actividad biológica, produciendo fermentaciones y descomposición y degradación de la materia orgánica e inorgánica.

Estos organismos pueden ser vegetales o animales, situándose así entre los seres vivos:

#### **6.3.1 Vegetales**

- Espermatofitos
- Micofitos
- Eumicofitos
- Mixomicofitos
- Euglenofitos
- Ficofitos
- Bacteriofitos
- Virus

#### **6.3.2 Animales**

- Cordados
- Metazoarios triblásticos
- Artrópodos
- Anélidos
- Rotíferos
- Protozoarios

- Rizópodos (amibas)
- Flagelados y Ciliados (Paramecium, Colpidium, Vorticela), etc. (EPA, 1990).

### **6.3.3 Mohos**

Son hongos que se implantan en la materia orgánica en descomposición. Atacan a los hidratos de carbono y a los productos nitrogenados (en la leche oxidan la caseína, produciendo urea, leucina, etc.).

Los más importantes son: Mucor, Oidium, Aspergillus, Penicillium, etc. (Howar, 2004).

### **6.3.4 Bacterias**

Son organismos unicelulares móviles o inmóviles de formas diversas (cocos, bacilos, espirilos, filamentosas) y de tamaño y modo de vida diferentes según la especie y el medio.

Se multiplican por división celular y su velocidad de reproducción puede ser frenada por varias causas, como por ejemplo:

- Naturaleza de la bacteria.
- Temperatura ( $0^{\circ}\text{C} < T < 45^{\circ}\text{C}$ ).
- Medio.
- Disminución de alimentos y del oxígeno disuelto.
- Acumulación de productos metabólicos tóxicos.
- Variaciones del pH al aparecer ácidos, productos amoniacales. etc.
- Competencia vital.

En ciertos casos, aunque se cumplan estas condiciones limitantes, las bacterias viven y se multiplican, como ocurre con las bacterias termófilas (viven bien a  $50^{\circ}\text{C}$ ), o con las anaerobias estrictas (Jiménez-Beltran *et al.*, 1996).

Podemos clasificar las bacterias de las aguas residuales urbanas según su nutrición, en dos grandes grupos (Rivas, 1996):

### **6.3.5 Bacterias parásitas**

Son las que han tenido como huésped al hombre o a los animales; suelen ser patógenas y producir graves enfermedades (tifus, cólera, disentería, etc.), y en el tratamiento de las aguas residuales son uno de los factores más importantes a tener en cuenta.

### **6.3.6 Bacterias saprofitas**

Son las que se nutren de los sólidos orgánicos residuales y provocan descomposiciones fundamentales en los procesos de depuración.

Según el medio, las bacterias de las aguas residuales urbanas se pueden clasificar en: Aerobias, anaerobias, facultativas y autótrofas.

#### **Bacterias aerobias**

Son aquellas que necesitan oxígeno procedente del agua para su alimento y respiración (Rivas, 1996).

El oxígeno disuelto que les sirve de sustento es el oxígeno libre (molecular) del agua, y las descomposiciones y degradaciones que provocan sobre la materia orgánica serán procesos aerobios, estos procesos se caracterizan por falta de malos olores (Lenntech, 2001).

### **6.3.7 Bacterias anaerobias**

Son las que consumen oxígeno procedente de los sólidos orgánicos e inorgánicos y la presencia de oxígeno disuelto no les permite subsistir. Los procesos que provocan son anaerobios y se caracterizan por la presencia de malos olores (Lenntech, 2001).

### **6.3.8 Bacterias facultativas**

Algunas bacterias aerobias y anaerobias pueden llegar a adaptarse al medio opuesto, es decir, las aerobias a medio sin oxígeno disuelto y las anaerobias a aguas con oxígeno disuelto (Garbisu, 2002)

### **6.3.9 Bacterias autótrofas**

Son aquellas que pueden sustentar su protoplasma a partir de sustancias minerales como anhídrido carbónico, sulfatos, fosfatos, carbonatos, etc. tomando la energía necesaria para sus biosíntesis a partir de la luz (bacterias

fotosintéticas) o a partir de ciertas reacciones químicas (bacterias quimiosintéticas) (Rivas y Sans, 1996).

Citaremos aquí las más importantes dentro de las aguas residuales urbanas según los procesos que en ellas se efectúan:

#### **6.4 Bacterias nitrificantes.**

Son las Nitrobacter y Nitrosomonas, que necesitan como fuente de energía reacciones químicas determinadas. Son aerobias. Las primeras oxidan el ácido nitroso y las segundas el amoníaco.

Bacterias ferruginosas y manganosas.

Son las que extraen su energía de procesos de oxidación de sales ferrosas o manganosas, y pertenecen a ella los géneros *Clonothrix*, *Leptothrix*, etc. (Garbisu, 2002).

##### **6.4.1 Tiobacterias.**

Las *Thiotrix*, *Beggiatoas* y otras oxidan el H<sub>2</sub>S, y al agotar el gas oxidan el azufre producido a ácido sulfúrico.

##### **6.4.2 Bacterias oxidantes del hidrógeno**

Las Hydrogenomonas oxidan el hidrógeno producido por las bacterias heterótrofas en las fermentaciones de los glúcidos, produciendo agua.

Otros vegetales.

Se presentan algas tipo *Euglena*, *Volvocales*, etc. (Lenntech, 2001).

##### **6.4.3 Virus**

El interés que tiene el conocer la gran variedad de virus que pueden aparecer en las aguas residuales, es por su acción nociva como agentes productores de enfermedades-cosa a tener en cuenta en los tratamientos en estaciones depuradoras- pues pueden infectar el tracto intestinal y pasar a las heces. En un gramo de heces podemos encontrar hasta 10<sup>9</sup> panículas de virus infecciosos.

Los virus más comunes en las aguas residuales urbanas son:

- Adenovirus.
- Enterovirus.
- Poliovirus.
- Echovirus
- Coxsackievirus.
- Hepatitis A.
- Reovirus.
- Rotavirus (Healh, 2002).

Es claro que el componente orgánico de las aguas residuales es un medio de cultivo que permite el desarrollo de los microorganismos que cierran los ciclos biogeoquímicos de elementos como el azufre, el carbono, el nitrógeno o el fósforo, entrando frecuentemente en competencia y eliminando los elementos microbianos patógenos que se pueden encontrar en el medio.

Este componente biológico se manifiesta fundamentalmente en 5 áreas diferentes:

- Descomposición de los compuestos orgánicos contenidos en las aguas residuales.
- Eliminación de determinados compuestos orgánicos que sean tóxicos para los vegetales y microorganismos del suelo.
- Desaparición de microorganismos patógenos.
- Participación en los ciclos biogeoquímicos del N, del P, y del S, elementos fundamentales cuando se presentan como nitratos, fosfatos o sulfatos en el movimiento y asimilación por el suelo y los vegetales.
- Reacciones de la materia orgánica transformada y del componente micro orgánico frente a los constituyentes minerales del suelo, participando en la promoción de micro agregados órgano minerales, variando la solubilidad de determinados iones y la solubilidad a lo largo de los diferentes horizontes del perfil, etc. (Mata-Gonzalez,1999).

Un último aspecto del componente biológico de las aguas residuales, es la presencia de determinados virus ya citados, quienes, aún en muy baja proporción

respecto a bacterias y microorganismos en general, manifiestan enorme peligrosidad desde el punto de vista sanitario. Los virus presentes en estas aguas residuales provienen de las excretas intestinales del hombre y los animales domésticos. Se han detectado unos 100 serotipos diferentes en las excretas humanas y su actuación depende del tipo de virus. Muchos son resistentes a casi cualquier tipo de tratamiento. El mayor problema lo plantean por su capacidad de detección con pequeñísima presencia de inóculo (Mata-Gonzales, 1999., Lentech, 2001).

A pesar de todo, si no se ingieren aguas residuales urbanas, si se tratan y si su uso se restringe a aplicaciones adecuadas, el peligro desde el punto de vista sanitario se reduce al mínimo. A ello ayuda, además, la acción del medio, pues hay que tener en cuenta que los virus siempre necesitan un elemento vivo para poder desarrollar su ciclo vital y si el líquido se aplica de forma apropiada, esa fase queda muy marginada y así se minimiza el riesgo (Salud ambiental, 2000).

## **7. PROCESOS COMUNES DE TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES**

En el tratamiento de aguas residuales existen dos procesos: los fisicoquímicos y los biológicos. Los primeros por razones técnicas se aplican en aguas con contaminantes inorgánicos o con materia orgánica no biodegradable, y los segundos son utilizados cuando los principales contaminantes son biodegradables. En virtud de lo cual los desechos líquidos de la industria de alimentos, agroindustria, agua residuales y algunos otros son tratados biológicamente. Las reacciones biológicas que se llevan cabo en estos procesos se consideran de las mismas que se realizan en el medio natural solo que bajo condiciones controladas y a mayor velocidad. Esta es la razón por la cual este proceso técnica y económicamente resulta el más apropiado para este tipo de contaminantes (Fletcher, 2006; ITE, 1995).

El principio básico del proceso consiste en que las aguas residuales se pongan en contacto con una población mixta, en suspensión flocú lenta en un sistema aireado y agitado. La materia en suspensión y la coloidal se eliminan rápidamente de las aguas residuales por adsorción y aglomeración en los floculo

microbianos. Esta materia y los nutrientes disueltos se descomponen luego más lentamente por metabolismo microbiano, proceso conocido como “estabilización” en este proceso, parte del material nutriente se oxida a sustancias simples como el anhídrido carbónico, un proceso denominado “mineralización”, y parte se convierte en una materia nueva celular microbiana, llamada “asimilación”. Parte de la masa microbiana se descompone también de la misma manera, un proceso llamado “respiración endógena”, el proceso oxidativa suministra la energía necesaria para los procesos de adsorción y asimilación. Una vez que se alcanza el grado de tratamiento que se desea, la masa floculenta microbiana conocida como “lodo”, se separa del agua residual por asentamiento, por lo general, en recipiente separado, especialmente diseñado. La etapa de separación se conoce también como “clarificación”, “asentamiento” o “sedimentación”.(Healt, 2002., Trejo, 2000).

## **8. MÉTODOS DE TRATAMIENTO MÁS UTILIZADOS**

### **8.1 Lagunas de estabilización:**

Son estanque de dimensiones específicas, diseñadas para el tratamiento biológico de las aguas residuales por un proceso natural de purificación bioquímica. Son de estructura sencilla de tierra, abiertos al sol y al aire para que puedan cumplir su misión depuradora (Lú-Chau, 1997).

Para el correcto funcionamiento de una laguna de estabilización deben desarrollarse los siguientes procesos:

- Oxidación progresiva de la materia orgánica en condiciones aeróbicas.
- Reaeración superficial
- Descomposición de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas.

### **Objetivos:**

- Reducir e inactivar organismos patógenos presentes en líquidos residuales.
- Disminuir la DBO o DQO del líquido.
- Permitir el rehúso del líquido.

### **Ventajas:**

- En las lagunas con grandes periodos de retención hidráulicos, generalmente se eliminan los huevos y quistes de los parásitos intestinales, lo que no ocurre en tratamientos convencionales, aun con desinfección.
- Puede tratar gran variedad de aguas residuales domesticas e industriales y agrícolas cuando la carga de la misma es biodegradable.

### **Desventajas:**

- En comparación a la cantidad de experiencias efectuadas, hay pocos modelos matemáticos y formulaciones de proyecto.
- Se requiere disponer de terreno apto para la ejecución de la laguna.
- Debe estar alejado de la zona poblada.
- En cursos sin agua permanente como ocurre en zonas secas no es aconsejable la aplicación de lagunas, ya que las algas del efluente pueden producir olores al descomponerse (EPA, 1996).

## **8.2 Clasificación de las lagunas de estabilización:**

### **- Aerobicas:**

Son lagunas que operan en presencia del aire, son de poca profundidad, De 1.20 a 0.8 metros, lo que propicia la proliferación de algas que suministran un buena parte del oxigeno necesario. Se logran eficiencias de DBO de 65% a 75%. Su desventaja principales la cantidad de terreno que requieren. En las lagunas aerobicas las sustancias degradables suspendidas y disueltas son estabilizada por la flora aeróbica microbiana. Soportan cargas orgánicas bajas y contienen oxigeno disuelto en todo instante y en todo volumen del líquido (Rivas y Sans, 1996; CONAGUA, 2004).

### **- Anaeróbicas:**

Generalmente se usan como una primera depuración o pre-tratamiento, se puede considerar como un digestor ya que se aplican cantidades de materia orgánica o

carga orgánica por unidad de volumen, de tal manera que prevalezcan las condiciones anaeróbicas es decir la ausencia del oxígeno, la eficiencia esperada con este tipo de lagunas varía con el tiempo de retención hidráulica; con tiempos de 1 a 10 días se obtiene una eficiencia de remoción de DBO de 20 al 60%. Una desventaja es la producción de malos olores que impide su localización en lugares cercanos a 500 m de zonas habitadas. Generalmente son estanques de 3.00 a 5.00 metros de profundidad; se proyectan para altas cargas orgánicas y no contienen oxígeno disuelto (Rivas y Sans, 1996).

**- Facultativas:**

Se puede decir que es una combinación de las dos anteriores, se diseñan con una profundidad variando normalmente entre 1.50 a 2.00 metros y una cantidad de materia orgánica por unidad de volumen que permita el crecimiento de organismos aeróbicos y facultativos (estos últimos pueden reproducirse tanto en presencia como en ausencia de oxígeno) (Riva y Sans, 1996).

Es el tipo de laguna más utilizado por su flexibilidad; requieren menos terreno que las aeróbicas y no producen los posibles olores de las anaeróbicas. Como en todos los procesos biológicos, el factor que afecta su eficiencia es la temperatura. Las eficiencias esperadas en estas lagunas van desde el 60% hasta 85% en remisión de DBO. La eficiencia en la remoción de bacterias puede alcanzar valores del 99.99%, debido a los tiempos de retención hidráulica tan prolongados; operan con una carga orgánica media. En las capas superiores hay un proceso aeróbico. En las capas inferiores se tiene un proceso anaeróbico donde se produce simultáneamente fermentación ácida y metánica (Jurado y Wester, 2001; Rivas y Sans, 1996).

**Estabilización por cal.**

En este proceso se añade cal al lodo crudo en cantidades suficientes para elevar su pH a 12, mínimo por dos horas, el pH alto mata los microorganismos presentes en el lodo por lo cual estabiliza la materia orgánica (Jurado-Wester, 2001).

Los inconvenientes de la estabilización por cal radican en el aumento de masa de la mezcla de lodo y cal, lo que significa más lodo a deshidratar y disponer, un costo relativamente alto y además el pH. Alto es una desventaja en la aplicación

de suelos agrícolas los cuales ya tienen un pH. alto. Dentro de las ventajas de estabilización por cal se tienen los tiempos de retención cortos que se requieren, la simplicidad del proceso y donde se tienen suelos ácidos, el pH alto de lodo beneficia su aplicación al suelo (Seoanez-Calvo,1995).

Existen dos formas de cal disponibles comercialmente la cal viva (CaO) y cal apagada (Ca(OH)<sub>2</sub>) en plantas pequeñas de tratamiento se utiliza la cal apagada porque se puede mezcla con agua y se aplica directamente. La dosificación de cal depende del tipo de lodo y del contenido de sólidos variando de 200-800 lb/ton de sólidos secos. Para estabilizar más el lodo digerido y ayudar a deshidratarlo se puede practicar tratamientos posteriores con cal. En sustitución de la cal se puede utilizar fly ash (fracción final de cenizas de cementeras), polvo de cementeras y carburo de cal (Lenntech, 2001)

### **Deshidratación.**

Procedimiento físico en el cual el contenido de humedad se reduce (contenido de sólidos aumenta). En la deshidratación de lodos se utiliza gran variedad de procedimientos y equipos. En plantas pequeñas los métodos principales son:

- a) lechos de secado
- b) deshidratación mecánica
- c) congelamiento de lodo
- d) lechos de juncos
- e) lagunas.

La deshidratación es requerida porque:

- a) Es mas eficiente el transporte de lodo
- b) Disminuye la manipulación y el almacenamiento.
- c) Se logra el contenido mínimo requerido de sólidos para el relleno de terrenos.
- d) Obtención de un menor contenido de sólidos para disposición final (EPA, 1999).

## **9. DAÑOS PRODUCIDOS POR CONTAMINACIÓN DE AGUAS**

Las dietas inadecuadas, la pobreza, la indigencia las malas condiciones higiénicas y sanitarias y el agua potable contaminada son condiciones ideales para la transmisión de enfermedades infecciosas y parasitarias. Muchas de estas infecciones son de gran importancia en la sociedad, puesto que producen una elevada mortalidad en poblaciones locales de las zonas tropicales: tuberculosis tífus, cólera, amibiasis difteria y fiebre tifoidea. Estas enfermedades, aunque no de una forma relevante, también han afectado a las capas sociales mas bajas de las zonas templadas (ITE, 1995., Lú-Chau, 1997).

Las enfermedades producidas por parásitos como la esquistosomiasis, la estrongiloidiasis, la Tenia entre otras, están ampliamente extendidas en condiciones sociales donde el agua y el suelo están contaminados por excrementos humanos, las enfermedades producidas por la aguas contaminadas, como la fiebre tifoidea y el cólera pueden erradicarse si se toman las medidas oportunas de higiene y descontaminación de las aguas potables (Salud ambiental, 2000).

El agua potable de uso domestico es esencial para el mantenimiento de la salud. La falta de agua potable lleva rápidamente a la deshidratación y la muerte; sin embargo, el agua es fuente de muchas enfermedades graves.

En todo el mundo, muchas casa tienen el suministro de agua de fuentes naturales, que son susceptibles de contaminación a través de diferentes vías:

- Uso de recipientes sucios
- Baño y lavado en aguas utilizadas también para beber
- Acceso de animales domésticos y salvajes
- Contaminación procedente de la industria y la agricultura (CONAGUA, 2004)

Enfermedades con origen en el agua

Las enfermedades que se adquieren como resultado de beber o bañarse en agua contaminada causan aproximadamente cada año 25 millones de muertes (Fortúbel e Ibáñez, 2000).

<b>Las principales enfermedades con origen en el agua.</b>	
<i>Enfermedades víricas</i>	<i>Enfermedades protozoarias</i>
Hepatitis A	Disentería amebiana
Poliomielitis	Giardiasis
<i>Enfermedades bacterianas</i>	<i>Parasitosis</i>
Tifoidea	Ascariidiasis (nematelmintos)
Cólera	Dracunculosis (gusano de Guinea)
Gastroenteritis (diarrea)	Esquistosomiasis (bilharziosis)

CUADRO 2. Principales enfermedades con origen en al agua (CONAGUA, 2004)

Muchas centrales hidroeléctricas y muchas fábricas vierten aguas que ha sido calentada y que puede causar importantes daños ecológicos, ya sea matando peces y otros organismos directamente, ya sea alterando el equilibrio de las poblaciones de los sistemas acuáticos. Además, el calentamiento del agua reduce la cantidad de oxígeno que puede disolverse en ella, lo que tiene importantes consecuencias para la vida acuática (CONAGUA, 2004).

Alrededor de los 4 millones de toneladas de petróleo que contaminan los mares de todo el año provienen del derramamiento de petróleo y de la fuga de este por el suelo. El petróleo alcanza el mar por medio de desagües, de alcantarillado y de corrientes de agua naturales. Los derramamientos accidentales de los buques petroleros causan un inmenso daño ecológico, especialmente evidente en las aves y otras criaturas marinas (Salud ambiental, 2000).

## **10. PRINCIPALES FUENTES GENERADORAS EN MEXICO.**

Los contaminantes industriales más comunes son los siguientes: metales pesados como el plomo, el mercurio, el zinc y el selenio., Residuos de tratamientos de minerales; partículas de arcilla; compuestos orgánicos, como el petróleo y derivados; gran cantidad de compuestos químicos inorgánicos (Irwin *et al.*, 2002).

En el tratamiento de aguas las industrias que más lodos residuales producen son la textil, química, farmacéutica, pulpa y producción de papel, metalúrgica, electro galvanizado, electrónica, mataderos, procesamiento de alimentos, curtido de cuero, industrias productoras de explosivos (Trejo, 2000).

De las 914 plantas depuradoras municipales, solo 600 funcionan y están trabajan en promedio por debajo de 70 por ciento de su capacidad instalada.

En muchos casos, las tecnologías sencillas son suficientes para mantener los valores límite de los acuíferos. En su mayoría las plantas depuradoras son estanques de estabilización en los cuales se trata 27 por ciento de las aguas residuales, 40 por ciento funciona con el tratamiento de lodos activados, según cifras de la Cámara Mexicana Alemana, (COMEXA) de comercio e industria; sin embargo gracias a la normatividad actual sobre el agua, 140 municipios y ciudades con más de 50,000 habitantes están iniciando ya la construcción de plantas depuradoras para cumplir con los valores máximos permitidos (ITSEMAP, 1999).

Quince cuencas reciben la mayor carga de contaminantes por agua residual municipal. Se trata de los ríos y lagos como el de Moctezuma, Papaloapan, Jalapa, Bravo-San Juan, Soto la Marina, Atoyac, Lerma-Toluca, Santiago-Aguamilpa, Grande-Amacuzac, Taquín, Pánuco, Yaqui y La Laja (Rivas y Sans, 1996).

## **11. BIORREMEDIACION**

Proceso que utiliza las habilidades catalíticas de los organismos vivos para degradar y transformar contaminantes tanto en ecosistemas terrestres como

acuáticos, presenta un enorme potencial en la mitigación de la contaminación ambiental (Irwin *et al.*, 2002; Randy *et al.*, 1999). La Biorremediación se ha centrado en la explotación de la diversidad genética y versatilidad metabólica que caracteriza a las bacterias para transformar contaminantes en productos inocuos o, en su defecto, menos tóxicos, que pueden entonces integrarse en los ciclos biogeoquímicos naturales. No obstante, existen casos aislados de utilización de otros tipos de organismos como, por ejemplo, los hongos y, más recientemente, las plantas (la llamada "fitorremediación") es un campo altamente prometedor (Garbisu 2002; Randy *et al.*, 1999, Lú-Chau, 1997)

### 11.1 Tipos de biorremediación

En los procesos de biorremediación generalmente se emplean mezclas de ciertos microorganismos o plantas capaces de degradar o acumular sustancias contaminantes tales como metales pesados y compuestos orgánicos derivados de petróleo o sintéticos.

Básicamente, los procesos de biorremediación pueden ser de tres tipos:

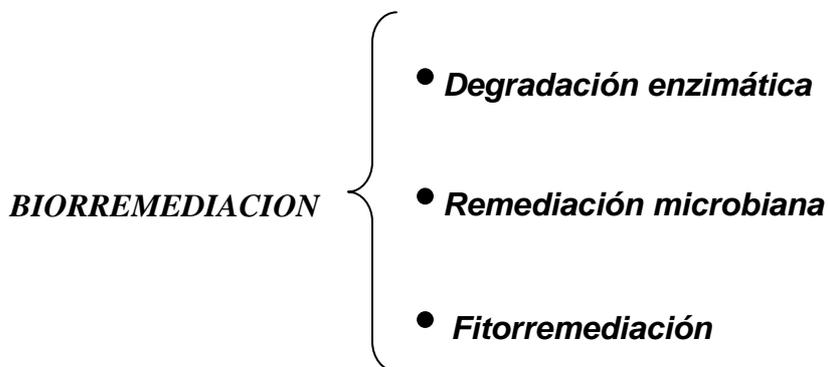


FIG 1 Diferentes modos de biorremediación

### 11.2 Degradación enzimática

Este tipo de degradación consiste en el empleo de enzimas en el sitio contaminado con el fin de degradar las sustancias nocivas. Estas enzimas se

obtienen en cantidades industriales por bacterias que las producen naturalmente, o por bacterias modificadas genéticamente que son comercializadas por las empresas biotecnológicas. Existe un amplio número de industrias de procesamiento de alimentos que producen residuos que necesariamente deben ser posteriormente tratados (Vásquez, 1993; Barrios *et al.*, 2001).

En estos casos, se aplican grupos de enzimas que hidrolizar (rompen) polímeros complejos para luego terminar de degradarlos con el uso de microorganismos. Un ejemplo lo constituyen las enzimas lipasas que se usan junto a cultivos bacterianos para eliminar los depósitos de grasa procedentes de las paredes de las tuberías que transportan los efluentes. Otras enzimas que rompen polímeros utilizados de forma similar son las celulasas, proteinasas y amilasas, que degradan celulosa, proteínas y almidón, respectivamente. Además de hidrolizar estos polímeros, existen enzimas capaces de degradar compuestos altamente tóxicos. Estas enzimas son utilizadas en tratamientos en donde los microorganismos no pueden desarrollarse debido a la alta toxicidad de los contaminantes. Por ejemplo, se emplea la enzima peroxidasa para iniciar la degradación de fenoles y aminas aromáticas presentes en aguas residuales de muchas industrias (Vásquez, 1993).

### **11.3 Remediación microbiana**

En este tipo de remediación se usan microorganismos directamente en el foco de la contaminación. Los microorganismos utilizados en biorremediación pueden ser los ya existentes (autóctonos) en el sitio contaminado o pueden provenir de otros ecosistemas, en cuyo caso deben ser agregados o inoculados (Randy *et al.*, 1999).

La descontaminación se produce debido a la capacidad natural que tienen ciertos organismos de transformar moléculas orgánicas en sustancias más pequeñas, que resultan menos tóxicas. El hombre ha aprendido a aprovechar estos procesos metabólicos de los microorganismos. De esta forma, los microorganismos que pueden degradar compuestos tóxicos para el ambiente y convertirlos en compuestos inocuos o menos tóxicos, se aprovechan en el proceso de

biorremediación. De esta forma, reducen la contaminación de los sistemas acuáticos y terrestres (Randy *et al.*, 1999., Semarnat, 2003).

La gran diversidad de microorganismos existente ofrece muchos recursos para limpiar el medio ambiente y, en la actualidad, esta área está siendo objeto de intensa investigación. Existen, por ejemplo, bacterias y hongos que pueden degradar con relativa facilidad petróleo y sus derivados, benceno, tolueno, acetona, pesticidas, herbicidas, éteres, alcoholes simples, entre otros. Los metales pesados como uranio, cadmio y mercurio no son biodegradables, pero las bacterias pueden concentrarlos de tal manera de aislarlos para que sean eliminados más fácilmente (Fletcher, 2006).

“METABOLISMO MICROBIANO”.

Los microorganismos ingieren contaminantes como fuente de carbono y algunos nutrientes como fósforo y nitrógeno. La digestión de estos compuestos en sustancias más simples como parte del metabolismo del microorganismo, puede resultar en la degradación del compuesto en forma parcial (transformación) o total a dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y agua (Randy *et al.*, 1999).

#### **11.4 Remediación con plantas (fitorremediación)**

La fitorremediación es el uso de plantas para limpiar ambientes contaminados. Aunque se encuentra en desarrollo, constituye una estrategia muy interesante, debido a la capacidad que tienen algunas especies vegetales de absorber, acumular y/o tolerar altas concentraciones de contaminantes como metales pesados, compuestos orgánicos y radioactivos (Randy *et al.*,1999; Barrios *et al.*, 2001). La fitorremediación ofrece algunas ventajas y desventajas frente a los otros tipos de biorremediación:

##### **Ventajas:**

- ✓ Las plantas pueden ser utilizadas como bombas extractoras de bajo costo para depurar suelos y aguas contaminadas.
- ✓ Algunos procesos degradativos ocurren en forma más rápida con plantas que con microorganismos.

- ✓ Es un método apropiado para descontaminar superficies grandes o para finalizar la descontaminación de áreas restringidas en plazos largos.

**Limitaciones:**

- ✓ El proceso se limita a la profundidad de penetración de las raíces o aguas poco profundas.
- ✓ Los tiempos del proceso pueden ser muy prolongados.
- ✓ La biodisponibilidad de los compuestos o metales es un factor limitante de la captación (Lenntech, 2001)

Las plantas pueden incorporar las sustancias contaminantes mediante distintos procesos que se representan en la siguiente ilustración y se explican en la tabla que continúa:

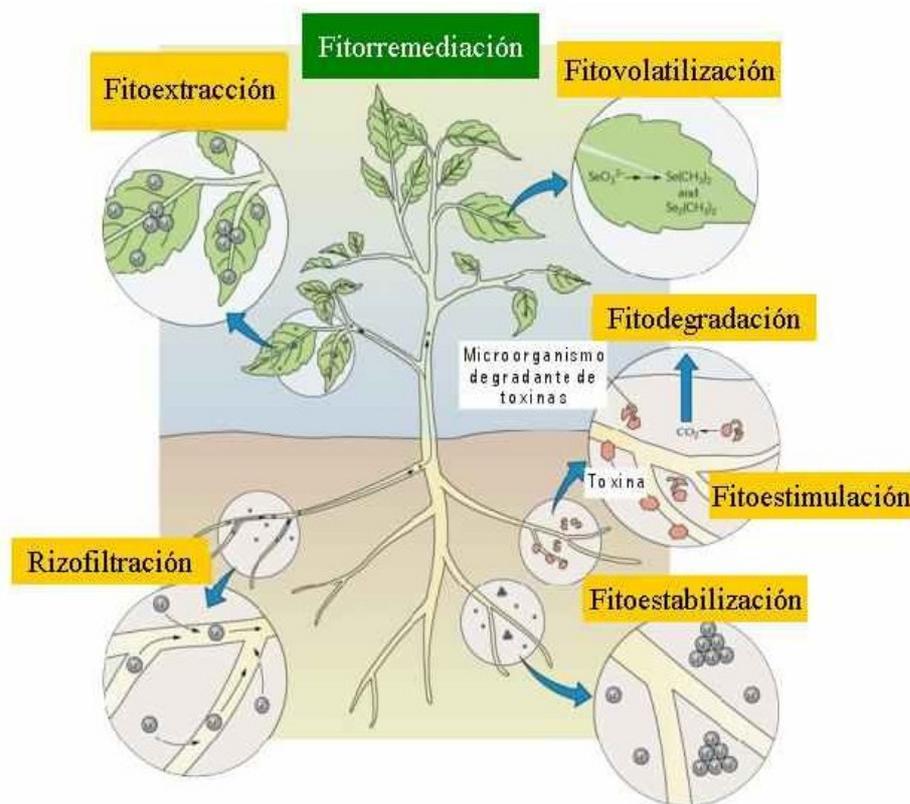


FIG. 2.0 FITORREMEDIACIÓN: Tipos de fitorremediación, en donde se indica la zona de la planta en donde ocurre el proceso.

## FITORREMIACIÓN

Tipo	Proceso Involucrado	Contaminación Tratada
<b>Fitoextracción</b>	Las plantas se usan para concentrar metales en las partes cosechables (hojas y raíces)	Cadmio, cobalto, cromo, níquel, mercurio, 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, 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 capas 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, nitrobenceno, nitrotolueno), atrazina, solventes clorados, DDT, pesticidas fosfatados, fenoles y nitrilos, etc.

CUADRO: 2. Principales plantas que actúan en la fitorremediación (Health, 2004)

Se conocen alrededor de 400 especies de plantas con capacidad para hiperacumular selectivamente alguna sustancia. En la mayoría de los casos, no

se trata de especies raras, sino de cultivos conocidos. Así, el girasol (*Helianthus annuus*) es capaz de absorber en grandes cantidades el uranio depositado en el suelo. Los álamos (género *Populus*) absorben selectivamente níquel, cadmio y zinc. También la pequeña planta *Arabidopsis thaliana* de gran utilidad para los biólogos es capaz de hiperacumular cobre y zinc. Otras plantas comunes que se han ensayado con éxito como posibles especies fitorremediadoras en el futuro inmediato son el girasol, la alfalfa, la mostaza, el tomate, la calabaza, el esparto, el sauce y el bambú. Incluso existen especies vegetales capaces de eliminar la alta salinidad del suelo, gracias a su capacidad para acumular el cloruro de sodio (Fletcher, 2006)

En general, hay plantas que convierten los productos que extraen del suelo a componentes inocuos, o volátiles. Pero cuando se plantea realizar un esquema de fitorremediación de un cuerpo de agua o un área de tierra contaminados, se siembra la planta con capacidad (natural o adquirida por ingeniería genética) de extraer el contaminante particular, y luego del período de tiempo determinado, se cosecha la biomasa y se incinera o se le da otro curso dependiendo del contaminante. De esta forma, los contaminantes acumulados en las plantas no se transmiten a través de las redes alimentarias a otros organismos (Fletcher A, 2006; Barrios *et al.*, 2001).

En cualquiera de las opciones anteriores, puede realizarse fuera del sitio si la contaminación está en el suelo superficial, pero necesariamente *in situ* cuando los contaminantes han alcanzado el manto freático. Cuando el tratamiento se hace fuera del sitio, pueden utilizarse bioceldas o biopilas sobre superficies impermeables que permitan la colección de lixiviados, de manera que no se contamine el espacio limpio. Además, después de la biorremediación el suelo se puede destinar al cultivo de especies vegetales para reincorporarlo a sus funciones biológicas más conocidas. En el caso de aguas subterráneas, la biorremediación se aplica a través del bombeo-tratamiento recarga que consiste en extraer el agua subterránea, promover la biodegradación de los contaminantes en reactores instalados en la superficie y posteriormente devolverla al acuífero, o bien, inyectar nutrientes y bacterias, de tal forma que se establece una recirculación y el sitio se convierte en un biorreactor. A pesar de ser la tecnología más empleada a nivel mundial, existen ciertos aspectos que determinan el éxito

de su aplicación por ejemplo: los contaminantes pueden estar fuertemente adsorbidos al material geológico, o bien, estar presentes en zonas de baja permeabilidad, lo que ocasiona limitaciones en la transferencia de masa (EPA, 1996).

## **12. LIMITACIONES DE LA BIORREMEDIACION**

A este punto es importante mencionar que la biorremediación tiene sus limitaciones y no se debe esperar una panacea. Se tiene que evaluar su efectividad en términos de costo-beneficio y compararla con otras tecnologías. Usualmente se compensa estas limitaciones por el ahorro en los costos, en comparación con otras tecnologías de restauración. La biorremediación es típicamente 30 a 40 % del costo del tratamiento químico, la incineración o el relleno industrial (Randy *et al.*, 1999).

Desafortunadamente, hay mucha equivocación e información falsa acerca de la biorremediación entre profesionales ambientales y en la industria mexicana. Una parte de esta equivocación se ha generado por vendedores demasiado entusiastas de los productos bacterianos comerciales, y otra parte probablemente resulta de una carencia general de enseñanza formal de las ciencias biológicas entre profesionales. Esta falta de comprensión acerca del manejo apropiado y limitaciones de la biorremediación frecuentemente lleva a resultados erróneos, y a menudo aumenta los costos de restauración (Irwin *et al.*, 2002).

### **12.1 Potencial de la biorremediación**

Actualmente se considera a la biorremediación como uno de los medios más apropiados para la restauración de muchos sitios contaminados.

La biorremediación es un método especialmente atractivo de restauración por varias razones: 1) porque usualmente es mucho menos costosa que las tecnologías alternativas, 2) porque es natural y normalmente no requiere el uso de agentes químicos (como solventes o detergentes), 3) porque transforma los contaminantes a productos no peligrosos, o los destruye completamente, en lugar de simplemente transferirlos a una fase diferente o a otra localidad (Randy *et al.*,

1999). Es 10 veces más económica que la incineración y 3 veces más económica que algunas tecnologías fisicoquímicas de inmovilización. Este bajo costo se debe a Varios factores, como un menor gasto de energía, bajo costo de los nutrientes y la operación bajo condiciones ambientales, que hace que su uso sea muy atractivo para los países en vías de desarrollo como México. (Aguilar *et al.*, 1994; Randy *et al.*, 1999)

El uso de microorganismos se ha extendido por todo el mundo, ya que de esta forma, el impacto ambiental que se tiene es el mínimo, considerando que lo único que se añade al medio son nutrientes, y que luego de haber eliminado el contaminante, los microorganismos retornan a su estado normal por falta de sustrato para degradar (Aguilar *et al.*, 1994).

Ultímente se han usado microorganismos nativos, los cuales funcionan mejor que varios productos comerciales (Randy *et al.*, 1999).

La biorremediación es una tecnología limpia, ya que los contaminantes pueden ser transformados hasta compuestos inocuos como el bióxido de carbono. Además de que cuando los nutrientes se agotan, incluyendo los contaminantes empleados como fuente de carbono, los microorganismos mueren (Gass y Sweeten, 1992).

La versatilidad de la biorremediación se basa en que puede adaptarse a las necesidades de cada sitio. Así, puede aplicarse bioestimulación si únicamente se requiere la adición de nutrientes para la actividad metabólica de la flora degradadora autóctona, bioincremento, cuando la proporción de la flora degradadora autóctona es muy reducida y se hace necesaria la adición de microorganismos degradadores exógenos o bien, bioventeo cuando es imprescindible el suministro de oxígeno para estimular la actividad microbiana degradadora presente en el lugar (Randy *et al.*, 1999).

## **12.2 Desventajas de la biorremediación**

La biorremediación no puede aplicarse en campo cuando:

Se tienen compuestos radioactivos

Los compuestos orgánicos contaminantes son altamente halogenados

Existen metales pesados en concentraciones tales que inhiben la actividad microbiana

Las condiciones microambientales son desfavorables debido a que cada microorganismo tiene sus propias características, la tolerancia que presentan a cada situación es muy particular. Puede ocurrir que cuando las concentraciones de los contaminantes orgánicos son muy altas, se observan fenómenos de inhibición de la actividad microbiana (Randy *et al.*, 1999; Gass y Sweeten, 1992).

Cuando el material geológico es netamente arcilloso, no es muy recomendable porque la baja permeabilidad limita la transferencia de masa en el sistema. Lo anterior es determinante cuando la contaminación llega hasta el nivel freático y el tratamiento necesariamente será *in situ*. Para suelos superficiales este problema puede superarse si se agrega arena, o bien, algunos residuos agroindustriales, con lo cual se aumenta la permeabilidad y se favorece así, la transferencia de masa (White *et al.*, 1997)

### **12.3 Riesgos de la biorremediación**

Una de las preocupaciones actuales dentro del campo de la biorremediación en México, es la constante introducción de productos comerciales patentados de origen microbiano. Desde un punto de vista muy riguroso, se sabe que los microorganismos nativos no son patentables porque son parte de la biodiversidad, solamente se pueden patentar aquellos que han sido modificados genéticamente (Fletcher, 2006).

Se ha visto que a México han llegado productos microbianos vendidos como “polvos mágicos” desconocidos capaces de destruir todo tipo de contaminantes, los cuales están siendo comercializados por gente de negocios que no tiene conocimientos de microbiología o de biotecnología y mucho menos, de bioseguridad. Una de las recomendaciones de los fabricantes de productos microbianos es realizar aplicaciones consecutivas al suelo contaminado con la finalidad de alcanzar una cierta proporción microbiana, pero la realidad en muchos casos es que los microorganismos mágicos no logran adaptarse a las

condiciones del sitio, y por más adiciones que se hagan no se registra la actividad degradadora (Aguilar *et al.*,1994).

Los productos microbianos, también se venden aditivos que son productos químicos patentados de formulación también desconocida, los cuales pueden ser nutrientes, o bien, tensoactivos. Estos últimos no siempre son biodegradables y cuando son agregados al suelo ayudan a la dispersión de los contaminantes, más que a su degradación. Cuando la aplicación de dichos productos se hace en una biopila o biocelda se pueden controlar dentro del sistema, pero si el tratamiento es *in situ* la dispersión de contaminantes ocurre en las aguas subterráneas o cuerpos de agua superficiales (Irwin *et al.*, 2002).

### **13. USO DE ORGANISMOS MODIFICADOS GENÉTICAMENTE EN BIORREMEDIACIÓN**

En los últimos años, los avances en ingeniería genética han permitido el desarrollo de organismos transgénicos. Y la biorremediación hace uso de esta nueva tecnología para resolver varios problemas de contaminación. El futuro promete aún más (Irwin *et al.*, 2002)

Muchos grupos de investigación están desarrollando en el laboratorio, plantas y microorganismos genéticamente modificados para ser mejores agentes de biorremediación, es decir que degraden mejor o más eficientemente a los agentes contaminantes. Se puede utilizar material genético de bacterias resistentes a metales para insertarlo en el genoma de una planta que, entonces, adquiriría esta nueva característica. Un grupo de investigación utilizó un gen llamado *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. Estos investigadores, consiguieron la transferencia del gen bacteriano *mera* a cultivos de *Liriodendro tulipifera* (álamo amarillo). El gen se expresó adecuadamente en ese material vegetal, de modo que las plántulas regeneradas germinaron y crecieron vigorosamente en los medios de cultivo, que contenían niveles de iones mercurio que son normalmente tóxicos, siendo capaces de captarlo en su forma iónica y de

reducirlo en el interior de la planta, tras lo cual era liberado en la forma gaseosa no tóxica (Fletcher, 2006)

Esta investigación ha abierto el camino para que en el futuro sea posible realizar plantaciones arbóreas transgénicas que, mediante este proceso de fitovolatilización u otros parecidos, sean capaces de descontaminar terrenos con altos niveles de contaminantes. Se están perfeccionando nuevos métodos de biotecnología para el tratamiento del agua, que eliminarán los compuestos que contengan fósforo, nitrógeno y azufre. Este bioprocesamiento se está extendiendo a varios procesos industriales, entre ellos los de las industrias petroquímicas, químicas y mineras, con el uso de bacterias oxidantes. La biorremediación mediante bacterias ofrece grandes posibilidades de limpiar y descontaminar sistemas complejos y gracias a sus ventajas económicas y ambientales será una de las tecnologías más desarrolladas durante este siglo. Se están utilizando cepas especializadas de microorganismos de alta actividad para tratar agentes contaminantes en diferentes sectores, como las industrias que utilizan catalizadores, las textiles, las curtiembres, el procesamiento de celulosa y almidón, la galvanoplastia, la minería, el desengrasado y recubrimiento de superficies y la impresión (SAGARPA, 2006)

### **13.1 Nuevos desarrollos biotecnológicos en plantas y bacterias**

Entre los desarrollos biotecnológicos que se están llevando a cabo para procesos de fitorremediación se encuentran los siguientes:

- Rizofiltración para la extracción de Uranio de aguas subterráneas en Asthabula, Ohio, EEUU.
- Rizofiltración a nivel de cultivo *in vitro* para detoxificar compuestos fenólicos en aguas contaminadas (por ejemplo los derivados de los herbicidas tradicionales y contaminantes como el 2,4-D) en la Universidad Nacional de Río Cuarto, Córdoba por el grupo de investigación de la Dra. Elizabeth Agostini.
- 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.

- Plantas transgénicas de tabaco con genes provenientes de bacterias que le permiten detoxificar TNT y GTN en suelos de campos minados.
- Plantas transgénicas de *Arabidopsis thaliana* que toleran la acumulación de cadmio, arsénico y mercurio.
- Bacterias *Pseudomonas* transgénicas que son capaces de degradar compuestos tóxicos que contienen cloro en compuestos menos nocivos.
- Microorganismos capaces de degradar TNT, un explosivo de gran potencia y muy agresivo para el entorno.
- Bacterias capaces de reducir las formas altamente tóxicas de mercurio en otras menos tóxicas y volátiles.
- Bacterias que transforman metales del suelo en formas menos tóxicas o insolubles. Por ejemplo: la reducción de cromo ( $\text{Cr}^{+6}$  a  $\text{Cr}^{+3}$ ).
- La utilización de la bacteria *Deinococcus radiodurans* para eliminación de elementos radiactivos presentes en el suelo y aguas subterráneas. Este microorganismo es un extremófilo que resiste condiciones extremas de radiación, sequedad, agentes oxidantes y diversos compuestos mutagénicos.
- Cianobacterias a las que se le han introducido genes de bacterias *Pseudomonas* con capacidad de degradar diferentes hidrocarburos o pesticidas (Figuerola *et al.*, 2002)

### 13.2 Biotecnología y medio ambiente

El crecimiento de la población y el avance de las actividades industriales a partir del siglo XIX trajeron aparejados serios problemas de contaminación ambiental. Desde entonces, los países generan más desperdicios, muchos de ellos no biodegradables o que se degradan muy lentamente en la naturaleza, lo que provoca su acumulación en el ambiente sin tener un destino seguro o un tratamiento adecuado. De este modo, en lugares donde no existe control sobre la emisión y el tratamiento de los desechos, es factible encontrar una amplia gama de contaminantes. Habitualmente, los casos de contaminación que reciben mayor atención en la prensa son los derrames de petróleo. Pero, en el mundo constantemente están sucediendo acontecimientos de impacto negativo sobre el medio ambiente, incluso en el entorno directo, generados por un gran abanico de agentes contaminantes que son liberados al ambiente (Glazer *et al.*, 1998., Trejo,

2000). Un ejemplo lo constituyen algunas industrias químicas que producen compuestos cuya estructura química difiere de los compuestos naturales, y que son utilizados como refrigerantes, disolventes, plaguicidas, plásticos y detergentes. El problema principal de estos compuestos es que son resistentes a la biodegradación, por lo cual se acumulan y persisten en el ambiente y lo perjudican tanto como a los seres vivos, entre ellos el ser humano. En las últimas décadas, entre las técnicas empleadas para contrarrestar los efectos de los contaminantes, se comenzó a utilizar una práctica llamada biorremediación. El término biorremediación fue acuñado a principios de la década de los '80, y proviene del concepto de *remediación*, que hace referencia a la aplicación de estrategias físico-químicas para evitar el daño y la contaminación en suelos. Los científicos se dieron cuenta que era posible aplicar estrategias de remediación que fuesen biológicas, basadas esencialmente en la observación de la capacidad de los microorganismos de degradar en forma natural ciertos compuestos contaminantes (Glazer *et al.*, 1998).

Entonces la biorremediación surge como una rama de la biotecnología que busca resolver los problemas de contaminación mediante el uso de seres vivos (microorganismos y plantas) capaces de degradar compuestos que provocan desequilibrio en el medio ambiente, ya sea suelo, sedimento, fango o mar (Glazer *et al.*, 1998; Fletcher, 2006)

### **13.3 Características de las tecnologías de biorremediación**

La más importante característica de la biorremediación es que los contaminantes no se destruyen, sino que a través de la actividad microbiana se transforman en compuestos químicamente diferentes, algunos de ellos pueden ser completamente degradados, de forma tal que cumple con la primera ley de la termodinámica (Ederrá-Indurain, 1996). Cuando la transformación llega hasta la generación de bióxido de carbono, se habla entonces de una completa mineralización. La complejidad química de los contaminantes y la limitación de nutrientes esenciales para la actividad metabólica, hacen que el proceso requiera de varios años, y en algunos casos no se logra su completa degradación. En los

sitios donde ocurren derrames de hidrocarburos que no son atendidos inmediatamente, la flora microbiana presente en el suelo se somete a un proceso de selección natural, en el que los microorganismos sobrevivientes son aquellos que desarrollaron capacidad degradadora. En esos casos, la mejor opción es utilizar la flora autóctona del sitio, en lugar de agregar microorganismos exógenos. Para tratar derrames recientes, probablemente será necesario recurrir a preparados microbianos frescos (Gobierno Vasco, 1995).

### **13.4 Aplicación de tecnologías de biorremediación en México**

A pesar de que no se cuenta en México con un inventario de sitios contaminados que sea del dominio público y que sirva de base para la estimación del mercado real de la biorremediación, es obvio que éste existe por tratarse de un país netamente petrolero. De hecho, esa es la razón por la que un importante número de compañías extranjeras llegan diariamente a México con la finalidad de vender sus productos o tecnologías de remediación de sitios. En varios casos los resultados han sido poco exitosos, por las bajas eficiencias de limpieza y un mayor deterioro ambiental por la adición de químicos desconocidos (UNE, 1996). La necesidad de dar solución urgente a varios problemas ambientales, muchas veces lleva a la aplicación de tecnologías disponibles en el mercado que no siempre aportan los resultados esperados. Un aspecto indispensable para lograr éxito durante la aplicación de cualquier tipo de Tecnología, es la necesidad de adaptar e innovar a casos específicos, o incluso realizar nuevos desarrollos, situación que aún no se ha dado en biorremediación. Un aspecto que al que se le ha dado poca importancia es que las características de cada suelo son diferentes y que no es una regla general que los microorganismos se adapten fácilmente a cualquier hábitat. En el caso de México, los suelos tienen características físicas, químicas y biológicas muy particulares, que los hacen diferentes a los suelos de otro lugar del mundo (Harmel *et al.*, 1997).

En las características de los contaminantes, conviene resaltar dos aspectos que son:

Su complejidad química y el hecho de que en algunos casos, tienen ya un avanzado grado de intemperismo. Estos aspectos, que por lo general no son

tomados en consideración, dificultan el tratamiento de un suelo contaminado y algunas tecnologías probadas exitosamente en otros países no han funcionado en México. Las compañías que cuentan con un buen respaldo científico deben tener bien identificadas las virtudes y limitaciones de sus tecnologías, con la finalidad de tomar la decisión de cuándo es conveniente sugerir su aplicación y cuándo es mejor emplear otra opción. Para aquellas tecnologías que se han aplicado en el extranjero es indispensable asegurarse de que hayan tenido experiencias previas al tratar contaminantes de composición conocida y comparable al tipo de contaminantes que comúnmente se encuentran en México (Prave *et al.*, 1997).

Un aspecto adicional que conviene señalar es que una gran mayoría de instrumentos jurídicos administrativos que se manejan en la práctica cotidiana, perjudican el desarrollo de trabajos ambientales enfocados a la limpieza de sitios (UNE, 1996) Para tomar una buena decisión se debe considerar que la mejor propuesta económica no siempre corresponde a la mejor alternativa técnica. Algo que debe enfatizarse es la importancia de realizar buenos trabajos de caracterización del sitio, de la contaminación y de la factibilidad de realizar el proceso por vía biotecnológica. En la práctica común los trabajos de caracterización están muy limitados y no están encaminados a comprobar que la biorremediación funcionará en campo. Esto permitiría conocer perfectamente el comportamiento del sitio y así plantear estrategias *ad hoc* para su remediación (EPA, 1999).

Las oportunidades de negocio para la biorremediación existen, pero dada la gran variedad de opciones que existen en el mercado y la poca experiencia de las empresas ambientales en este campo, se plantea la necesidad de establecer políticas en las que se demuestren aspectos como:

- conocer la base científica de funcionamiento de la tecnología.
- la existencia de experiencias previas, buenas o malas, en otros sitios donde se hayan tratado contaminantes de composición química similar
- que se cuenta con el personal técnico idóneo que será responsable del proyecto en campo y que domina la tecnología, de tal forma que pueda solucionar imprevistos durante el proceso.

- haber realizado una caracterización completa del sitio, incluyendo las pruebas de biofactibilidad para el problema específico que va a ser tratado.
- justificar el uso de productos microbianos y de aditivos y dar a conocer su composición y características de seguridad hacia el ambiente.
- contar con un protocolo bien elaborado donde se establezca el seguimiento que se dará al proceso durante la aplicación de la tecnología en campo.

En los casos donde no se tengan experiencias previas bajo las condiciones que imperan en México, será conveniente realizar pruebas piloto de demostración en campo, antes de operar en escala real (Gillen, 1999)

Los aspectos mencionados conforman el marco de referencia bajo el cual, el Instituto Nacional de Ecología dará la certificación a tecnologías para la remediación de sitios contaminados. Para este procedimiento se apoyan en órganos colegiados representados por universidades y centros de investigación de prestigio en el área. En este sentido, el Instituto de Ingeniería ha venido colaborando de manera muy cercana con las autoridades ambientales actuales (EPA, 1997).

#### **14. RECOMENDACIONES PARA UN PROYECTOS DE BIORREMEDIACIÓN**

En el desarrollo de proyectos en biorremediación es conveniente integrar expertos en las diferentes disciplinas involucradas, como son: biotecnología, geohidrología, ciencias del suelo, ingeniería, química y legislación ambiental, quienes deben integrarse completamente en el problema desde que se inicia la caracterización. Esto permitirá sentar las bases para plantear estrategias que conduzcan a la solución de cada problema en particular. La caracterización de un sitio contaminado debe considerarse como un diagnóstico muy preciso, ya que de aquí se genera la información que será utilizada, tanto para la definición de responsabilidades, como para la planeación de las actividades de remediación (Randy *et al.*, 1999).

El trabajo de campo se inicia con la prospección del sitio y su caracterización en la que se incluyen tres enfoques básicos: geohidrológico, fisicoquímico y microbiológico. La evaluación integrada de los resultados obtenidos permitirán

definir la posibilidad de aplicar una biorremediación mediante estrategias *ad hoc* para cada sitio (Aguilar *et al.*, 1994).

En la práctica común, la caracterización microbiológica es poco considerada, a pesar de que es determinante para definir la aplicabilidad de una biorremediación. Consta de dos tipos de estudios, la cuantificación de los microorganismos presentes incluyendo las pruebas de biofactibilidad, y los estudios de biodegradabilidad en el laboratorio. Estos últimos son indispensables para predecir el tiempo que tomará la biodegradación en campo. La estrategia para la limpieza de un sitio es única para cada caso, y debe estar bien soportada en los resultados de su caracterización, de la misma forma que el médico que opera a un paciente, es aquel que diagnosticó la enfermedad y después de varios estudios y análisis sugiere una cirugía. Dada la importancia de la caracterización de un sitio, no se debe considerar que ésta es solo un requisito administrativo, sino una verdadera necesidad técnica en la que no se deben escatimar recursos y se deben involucrar expertos en el área.

Por lo que respecta al seguimiento de la concentración de contaminantes, existen dos enfoques uno de ellos es seguir la reducción de los compuestos químicos más tóxicos los cuales sirven como indicadores y el otro es utilizar un parámetro más general. Por ejemplo, en el caso de sitios contaminados con gasolinas se puede hacer referencia a los hidrocarburos monoaromáticos volátiles: benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX), o bien, al contenido de hidrocarburos totales. Al establecer los límites de limpieza será necesario definir cuál de los dos conceptos es el más adecuado, dado que el primero se refiere a la reducción de la toxicidad y el segundo a la limpieza del sitio (Fletcher, 2006).

La tendencia actual parece inclinarse hacia una evaluación de riesgo, pero también se recurre a normatividades extranjeras que varían en un amplio margen. La primera opción toma su tiempo y tiene un costo, con la segunda se tendrá la incertidumbre de saber si fue la más adecuada (Aguilar *et al.*, 1994).

## **15. BIOSOLIDOS**

Las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) generan un subproducto conocido como “biosólidos” en México o como “sewage sludge” o

“biosolids” en otros países, que es un material semisólido, oscuro, con alto contenido de materia orgánica y nutrientes, que puede ser utilizado como abono en los suelos deteriorados. No obstante, este subproducto, que es resultado de un proceso de estabilización, actualmente representa un problema de tipo ambiental debido a su contenido de contaminantes como micro-organismos patógenos y metales pesados. Es por ello que para su aprovechamiento como mejorador de suelo y fertilizante, los biosólidos deben ser declarados “no peligrosos” para el ambiente, en base al análisis CRETIB (corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad y biológico-infeccioso) de la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al ambiente (LGEEPA) de la SEMARNAT (Avila *et al.*, 1996).

### **15.1 Generación, composición de biosólidos**

Se desconoce la cantidad exacta de biosólidos generados en México; no obstante algunas estimaciones en 1994 reportan cifras de 100, 000 toneladas para la región centro del país (Colin *et al.*, 2001). Pero otras consideran una generación de 12 millones de toneladas año<sup>-1</sup> en mas de 1000 PTAR distribuidas en el país. Con base a las expectativas del incremento en la capacidad para el tratamiento de aguas residuales para cumplir con norma ambiental NOM-001-SEMARNAT-1996 se estima que la generación de biosólidos en México alcanzara aproximadamente las 650,000 t, en materia seca (MS) por año, en un futuro próximo; para Estados Unidos, se estima en 12 millones para la comunidad Europea, con 15 países miembros, 7.5 millones (Colin *et al.*, 2001., Cooley, 1998).

Los biosólidos pueden ser de tipo domestico o industrial, dependiendo de la procedencia de las aguas residuales, donde los primeros contienen menos contaminantes; también pueden ser aeróbico cuando se realiza un tratamiento de digestión con bacterias y de tipo anaeróbico, que aunque costoso, es más eficaz para disminuir la cantidad de patógenos (Gomez *et al.*, 2001). Los biosólidos también pueden ser líquidos deshidratados o secos, de acuerdo a su contenida de humedad y como resultado de los procesos en las PTAR.

Los biosólidos contienen un alto porcentaje de humedad, materia orgánica (MO) y nutrimentos para las plantas como N y P; sin embargo su composición varía diario

y de manera estacional, aún dentro de una misma planta de tratamiento (Gomez *et al.*, 2001). Además de contener metales pesados como el Cd, Cr y Pb, microorganismos patógenos y algunos compuestos orgánicos potencialmente tóxicos para el suelo y las plantas (Harmel *et al.*, 1997).

## **15.2 Alternativas de disposición de biosólidos**

Las tres opciones más importantes para el uso y la disposición final de biosólidos son la confinación en rellenos sanitarios, la incineración, y la reutilización en agricultura y bosques (Tisdale *et al.*, 1993). La disposición en rellenos sanitarios y la incineración a pesar de su viabilidad, representa un riesgo de contaminación para el suelo, las aguas subterráneas y el aire, además de que representa un desperdicio de nutrimentos, que pueden ser utilizados en la agricultura pastizales y bosques. De acuerdo a las leyes ambientales, así como a las condiciones económicas en la actualidad la aplicación de biosólidos a tierras agrícolas, de bosques y de pastizales es recomendable y benéfica (Gomez *et al.*, 2001; Outwader, 1994; Gass y Sweenten, 1992).

## **15.3 Efectos de los biosólidos sobre las propiedades del suelo y agua**

La evaluación de los efectos de los biosólidos y pastizales se inicia en la década de los 80's en Nuevo México, se observó que la aplicación superficial de biosólidos, en dosis desde 7 hasta 90 toneladas MS ha<sup>-1</sup>, aumentó la infiltración de agua y conservó el contenido de humedad del suelo. Además, redujo la erosión de suelo en pastizales semiáridos (Moffet, 2001., Aguilar *et al.*, 1994). En un pastizal degradado de zacate Navajita, la aplicación superficial de biosólidos en dosis de 22.5 hasta 90 toneladas MS ha<sup>-1</sup> mostró resultados muy promisorios para la reutilización de nutrientes y pastizales nativos (Walter *et al.*, 2002) ya que se obtuvieron incrementos en el contenido de macro y micro nutrientes en el suelo, así como un efecto neutral, o no incremento, en el contenido de algunos metales pesados.

La aplicación superficial de biosólidos ha mostrado efectos favorables en la concentración de  $\text{NO}_3\text{-N}$  en suelos de pastizales semiáridos en Texas, en condiciones de campo y en condiciones controladas (Mata-Gonzalez, 1999).

La aplicación de biosólidos puede tener pérdidas de nutrientes en forma de gases. Se ha evaluado la volatilización de amoníaco a través de colectores dinámicos y semiabiertos en condiciones de campo y con diferentes temperaturas ambientales en dosis de 7 o 18 t MS  $\text{ha}^{-1}$  de biosólidos aplicados sobre la superficie en dos tipos de suelo. Los resultados muestran una mayor volatilización de amoníaco en la dosis más alta en los suelos, con mayores pérdidas durante las primeras 36 h. especialmente en temperaturas intermedias (6 a 23 ° C) y cálidas (20 a 36° C). En general las pérdidas de nitrógeno alcanzan desde un 8% hasta un 17% del total de amonio presente en los biosólidos (Howar, 2004., Walter, 2002).

Algunas investigaciones mencionan que la conductividad eléctrica (CE) del suelo se incrementa con la aplicación de biosólidos en pastizales de Nuevo México por el contrario, el pH. del suelo disminuye ligeramente con la aplicación de lodos orgánicos (Aguilar *et al.*, 1994).

Se han evaluado los efectos de los biosólidos en las propiedades biológicas de los suelos. El primer trabajo evaluó la aplicación superficial de biosólidos en campo y se observó un incremento en el contenido de nematodos en el suelo de un pastizal degradado en Nuevo México. Las poblaciones microbiales del suelo tales como las bacterias aeróbicas heterotróficas, hongos (*e.g. Mucor spp.* Y *penicillium chrysogenum*) y bacterias oxidantes del amonio (nitrosomonas) se incrementaron linealmente en la medida que se incrementó la dosis de biosólidos (Aguilar *et al.*, 1994; Outwader, 1994).

Los biosólidos incrementaron la concentración de  $\text{CO}_2$  en la cámara de temperatura, especialmente durante los tres primeros días en las tres condiciones. Al final del estudio (29 días) la población microbiana en el suelo y en los biosólidos se incrementó significativamente con las temperaturas de primavera-otoño y verano (Outwader, 1994).

En otros estudios realizados en la parte central de Nuevo México para evaluar los efectos de largo plazo (8 años) de la aplicación superficial de biosólidos domésticos-anaeróbicos-secos, en dosis de 22.5, 45 o 90 t MS ha<sup>-1</sup>, sobre las propiedades de los suelos en pastizales semiáridos, se reportaron resultados favorables; similarmente, en el sur de Nuevo México se estimó que aproximadamente el 32% de los biosólidos aplicados persistieron en el suelo en fragmentos mayores de 2 milímetros, después de 18 años de aplicación. Lo anterior debido al origen recalcitrante de los biosólidos combinado con las condiciones ambientales del suelo en zonas áridas (Walton *et al.*, 2002).

Estudios en condiciones controladas, han evaluado los efectos de la aplicación superficial de biosólidos en dosis de 7 hasta 90 toneladas ha<sup>-1</sup>, sobre la cantidad y calidad del agua lixiviada en suelos de pastizales semiáridos <sup>(40)</sup>. Se utilizaron lisímetros (columnas) con suelo intacto, y durante el primer año de estudio se obtuvieron incrementos en contenidos de sulfatos, ortofosfatos y nitratos en el lixiviado, especialmente en la dosis más alta; las concentraciones de los siguientes elementos analizados en el lixiviado de las columnas no fueron afectadas por la aplicación de biosólidos: Ag, As, Be, Cd, Cu, Cr, Fe, Mo, Ni, P, Pb, At y Ti. Los biosólidos incorporados al suelo franco-arcilloso disminuyeron considerablemente la infiltración del agua. Los efectos sobre la composición del lixiviado (Walton *et al.*, 2001).

#### **15.4 Efectos de biosólidos sobre vegetación**

Los biosólidos han sido comparados con fertilizantes y otros materiales en pastizales semiáridos de Texas. Las aplicaciones en invierno mostraron mayores rendimientos de forraje de navajita, de las aplicaciones de urea y fósforo de amonio aplicados en la misma época. Además, durante el tercer año se observaron efectos residuales sobre el rendimiento de forraje del zacate navajita. La aplicación superficial de biosólidos en dosis de 18 o 34 t MS ha<sup>-1</sup> y un material sintético fueron evaluados para simular el efecto de acolchado, en zacate toboso y navajita en pastizales semiáridos de Texas; dosis de 34 toneladas

incrementaron la producción de forraje y concentración de N en el navajita (Cooley, 1998).

La producción del forraje del zacate toboso se incremento linealmente durante los cuatro años de estudio, observándose mayores incrementos con la aplicación superficial de biosólidos dos veces al año, en invierno-y-verano, en tres de los cuatro años de estudio. La concentración de N del zacate toboso presento efectos lineales y cuadráticos con el uso de biosólidos y, similarmente a la producción de forraje, la mejor respuesta se observo con las aplicaciones de invierno-verano. También se observaron efectos residuales sobre la producción y calidad del zacate toboso durante el segundo, tercer y cuarto año de estudio (Howar, 2004; Brenton, 1995).

El método de aplicación e biosólidos es importante, pero existe poca información; sin embargo, diversos autores coinciden en que la incorporación de biosólidos al suelo en ecosistemas naturales no es recomendable puesto que se ha observado un efecto detrimental sobre la vegetación (Gillen, 1999).

Se han reportado los efectos de los biosólidos sobre la fisiología de plantas, superficialmente presentaron efectos benéficos y aparentemente perjudiciales en condiciones de invernadero (Hederá, 1996).

En relación a los efectos de los biosólidos sobre el comportamiento de ganado bovino de carne en pastizales semiáridos existe escasa información. En pastizales de navajilla con 20 t MS ha<sup>-1</sup> se observaron incrementos de peso desde 0.63 kg animal<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup> en áreas sin tratar, hasta 0.83 kg en áreas tratadas, en el segundo año. Además los animales pastorearon mas tiempo en áreas tratadas (58 % del tiempo) que en las áreas sin tratar. En la misma área, las estimaciones por medio de isótopos mostraron que solo el 22 % de N del forraje proviene de los biosólidos y que 84 % del forraje proviene de áreas tratadas Además, los animales pastoreados en áreas tratadas, mostraron niveles por debajo de los límites permitidos de minerales como Al, Cd, Cu, Mg, Mn Y Zn en riñón, hígado, corazón y músculo (Pillai *et al.*, 1996; Brenton, 1995).

Se han documentado otros efectos de la aplicación de biosólidos en pastizales. En un estudio se detectó un bajo riesgo de transmisión aérea de bacterias patógenas en el ambiente con aplicaciones comerciales de 7 t MS ha<sup>-1</sup> en pastizales del oeste de Texas durante cuatro años (Gass y Sweenten, 1992). La calidad del aire se ha evaluado por medio de la medición de partículas sólidas presentes en el aire a tres años, en un rancho de 7,200 ha al aplicar 7 t MS ha<sup>-1</sup> de biosólidos en Sierra Blanca Texas. Se encontraron mayores cantidades de partículas cerna de las áreas de trabajo y en caminos de acceso; sin embargo la erosión eólica (cantidad de partículas de suelo perdidas) disminuyó en las áreas aplicadas, comparadas con las áreas no aplicadas fuera del rancho (Villalobos *et al.*, 1997).

## **16. ASPECTOS NORMATIVOS:**

La Norma Oficial Mexicana NOM-004- SEMARNAT- 2002- Protección Ambiental.- Lodos y Biosólidos- Especificaciones y limites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final, fue publicada en el Diario Oficial de la Federación el 15 de agosto del 2003. Dicha Norma contiene los lineamientos para el manejo y disposición de lodos y biosólidos en México (Harris-Pierse *et al.*, 1993).

### **16.1 Limitaciones y prácticas de manejo recomendadas**

La NOM-004-SEMARNAT-2002 establece los límites en la concentración de algunos elementos en los biosólidos que se aprovechan en los terrenos con fines agrícolas, incluyendo pastizales. El general, los biosólidos para usos forestales, mejoramiento de suelos y usos agrícolas deberán cumplir con las concentraciones indicadas para los biosólidos se establece en función del tipo y clase y su contenido de humedad hasta el 85 % (Harris-Pierse *et al.*, 1993).

Además, la USEPA (United States Enviromental Protection Agency) recomienda realizar las siguientes prácticas de manejo para el uso de biosólidos en la agricultura, incluyendo pastizales (Avila *et al.*, 1996).

1) No aplicar biosólidos en lugares que contengan una planta amenazada o en peligro de extinción; 2) restricción en sitios inundados, congelados o cubiertos de nieve para evitar contaminación de agua; 4) no exceder la dosis agronómica de nitrógeno; 5) etiquetar envases y contenedores de biosólidos (Bridgman, 1990).

El cumplimiento de las nuevas leyes y normas ambientales sobre el tratamiento de aguas residuales; permitirá un aumento en la generación de biosólidos a nivel nacional e internacional. Esto nos obliga a la búsqueda de mejores alternativas para el aprovechamiento de los biosólidos en términos económicos, sociales y ambientales (Villalobos *et al.*, 1997).

## **17. LA BIOTECNOLOGÍA COMO MEDIO PARA PREVENIR LA CONTAMINACIÓN:**

Bioteología: el uso de microorganismos, enzimas microbianas como catalizadores y materias primas para procesos reduce o elimina la necesidad de controlar la contaminación. Muchos procesos de la bioteología podrían reemplazar a los actuales procesos de producción a fin de crear la “manufactura incorporada al medio ambiente” o el “bioprocesamiento” ecológico (Randy *et al.*, 1999)

Gracias al uso de los procesos biológicos, los materiales vuelven a su ciclo dentro de los ecosistemas sin que haya existido un uso disipativo del material o algún efecto de espiral en el ecosistema global.

Provechos de la bioteología:

Las aplicación de la bioteología aprovechan los procesos naturales empleando microorganismos comunes y, por lo general, nativos.

Estos son algunos de los procesos en los que la bioteología:

- En la producción clásica de alimentos y bebidas
- En la producción de moléculas orgánicas de alta complejidad para efectos medicinales (antibióticos y proteínas)
- En el reemplazo de varias reacciones químicas secuenciales para conversiones estereo específicas y muy selectivas (compuestos quirales, esteroides)
- En la degradación o tratamiento de sustancias toxicas diluidas en el medio ambiente (desechos industriales en el aire, en el agua y en el suelo)

Los posibles usos benéficos de los procesos biológicos son innumerables son innumerables y la cantidad de aplicaciones prácticas se incrementará en la próxima década. Son muchas las necesidades sociales que la biotecnología puede satisfacer y satisfará, como en el caso de los biocombustibles producidos de la biomasa agrícola y las nuevas plantas que sobreviven en diferentes climas y que son resistentes a las enfermedades los nuevos avances en biotecnología (o “eco tecnología”) permitirá que utilice todo el potencial de la biodiversidad en la tierra (Harry, 1992).

## **18. TÉCNICAS PARA PREVENIR LA CONTAMINACIÓN**

### **18.1 Reciclado:**

Es la manera más sencilla de controlar la contaminación, principalmente en Europa y Estados Unidos se reciclan latas de aluminio, recipientes de vidrio, papel, plásticos y materiales de empaque; por lo general estos productos se reutilizan en la propia producción, sin embargo, el hecho de reciclar desechos orgánicos caseros dará lugar a un nuevo y útil producto: la composta. En Suiza, el desecho orgánico casero se deposita en una bolsa degradable conocida como “bolsa verde” (Harry, 1992).

#### **1. Cambios en el producto**

- **Sustitución del producto**
- Conservación del producto
- Cambio en la composición del producto

- Rediseño del producto
- **Reciclado del producto**

## 2. Control de la fuente

- Cambios en el material de insumos
- Purificación del material
- Sustitución del material
- Cambios o modificaciones de tecnología

### **Modificación del proceso**

Cambios del equipo

Automatización

Mayor control

- Buenos métodos de operación

Medidas de procedimiento

Prevención de pérdidas

Métodos de administración

Separación de flujos de desecho

Mejoras en el manejo de materiales

Mejoras en la programación

Capacitación de los empleados

## 3. técnicas de control ambiental (Jiménez *et al.*, 1996).

### **CONCLUSION:**

La biorremediación, como una tecnología tiene un gran potencial en la extracción de contaminantes. La energía metabólica de los organismos es una fuente prácticamente inagotable, ya que estos, por medio de su amplia diversidad, son capaces de utilizar cualquier sustrato como fuente de energía.

La energía metabólica microbiana puede ser utilizada para la descontaminación de aguas de muchas formas, y de forma secundaria la producción de biosólidos como una segunda fuente de energía; El contenido de MO y nutrientes como N y

P hacen de los biosólidos un subproducto con alto potencial para ser utilizado en pastizales; sin embargo su gran variabilidad en la composición química es una limitante cuando se trata de establecer un programa de aprovechamiento o uso benéfico, ya que el alto costo de análisis representa un problema para el usuario.

Entre las alternativas que existen en el mercado para la limpieza de sitios contaminados, la biorremediación se ha perfilado como una opción muy atractiva por ser relativamente económica y amable al ambiente.

### **BIBLIOGRAFIA**

Aguilar, R., S.R. Loftin, T.J. Ward, K.A. Stevens y J.R. Gosz, 2004. (En línea) Sewage sludge application in semiarid grasslands: Efects on vegetation and water quality. Technical completion report. New Mexico Water Resources Research institute, USDA Forest Service, Univ. of New Mexico.

([http://www. Enviromentaldefense.org/documents.Aguilar Fernández](http://www.Environmentaldefense.org/documents.Aguilar_Fernández))  
(consulta 9 Noviembre 2006).

Asociación española para la calidad -AECC- 1994. Guía para la realización de auditorias medioambientales en las empresas. Madrid.

Ávila, C.J.M., G.C. Villalobos., R.E. Sosebee., C.M. Britton., E.B. Fish., D.B. Wester y R.E Zarmat, 2003. Efecto de biosólidos en pastizales del oeste de Texas en el contenido de minerales en tejidos de novillos en pastoreo. XXXIX Reunión nacional de investigación pecuaria. México, DF. 2003:374 pp.

Barrios, J.A., A. Rodríguez, A.González., C. Maya. 2001. Quality of sludge generated in wastewater treatment in waterwader treatment plants in Mexico: meeting the proposed regulation. In: Specialised conference on sludge regulation, tratment, utilization and disponsal. International Water Association (IWA)- UNAM-UAM. Acapulco, Mexico. 2001:54-61.

- Bordacs-Irwin, 1998. La biotecnología como medio para prevenir la contaminación, Newtown, Pennsylvania.
- Brenton, C. 1995. Evaluation of soil water quality following the application of biosolids on a semiarid rangeland an Texas (M. Sc. Dissertation). Lubbock, Texas Tech University., USA.
- Bridgman, A., Howard 1990. Global air pollution: problems for the 1990s. chichester : john wiley & sons limited, 1990.
- Colín, CA, C.R. López, C.O. Olea, D.C. Barrera y F.C. Valdez, 2001. Generated from the termal treatment of sewage sludge treatment. In. Specialised conference on sludge regulation, treatment, utilization and disponsal. International Water Association (IWA)-UNAM-UAM. Acapulco, Mexico. 2001:164-171.
- Comisión Nacional del agua. 2004. Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento primera reimpresión Octubre 2004. Mèxico D.F. pag. 2, 155,173-182.
- Cooley, EP. 1998. Biosolids and chemical fertilizer application on the Chihuahuan Desert grasslands. Lubbock, Texas, USA. Texas Tech University. (M. Sc. Disserlation).
- Ederra-indurain, A. 1996. Botánica ambiental aplicada, las plantas y el equilibrio ecológico. Pamplona: Ediciones Eunsa.
- Espinosa, L.1997. El AGUA (Las aguas residuales y sus tratamientos) Pág. 9-13, Editorial Mc GRAW-HILL.
- Figuroa, VU, O.M.A, Flores y R.M. Palomo, 2003. Uso de biosólidos en suelos agrícolas. SAGARPA-INIFAP-CIRNOC-Campo Exp. Valle de Juárez. Folleto técnico No. 3.

- Fletcher, A. 2006. Advances in biotechnological engineering and biotechnology. 52 microbial and enzymatic bioproducts.
- Fortúbel R., y Ibáñez N. 2000. Fuentes de energía biológica: empleo de metabolismo microbiano para la descontaminación de aguas. Universidad Loyola (La Paz, Bolivia) fonturbel@mbotanica.zzn.com.mx (Consulta 20 de septiembre de 2006).
- Fresquez, P.R., R.E. Francis, G.I. Dennis, 1990. Soil land vegetation responses to sewage sludge on a degraded semiarid broom snakeweed/blue grama community. *J Range Management.*, 43:325- 331.
- Garbisu, C., I. Amézaga y I. Alkorta 2002. (En línea) Biorremediación y Ecología. *Ecosistemas2002/3* <http://www.aeet.org/ecosistemas/023/opinion1.htm> (Consulta 22 Noviembre de 2006).
- Gass, W.B., J.M.Sweeten, 1992. Benefits of applying sewage sludge on agricultural land. *Texas Agric Ext Serv. College, Station, TX. The Texas A&M Univ. System; Publ. B-1637; 1992:1-13.*
- Gillen, R.L. 1995. Land application and agroecosystem wildlife impacts. In: *Land application of biosolids : A review of research concerning benefits, environmental impacts, and regulation of applying treated sewage sludge. Okla Agric Environ. Publ. B-808. 1995:31-33.*
- Glazer, A.N., H. Nikaido, 1998. *Microbial Biotechnology.* Ed. W.H. Freeman and CO.
- Gobierno Vasco, 1995. Tratamiento de aguas residuales en núcleos de población reducidos. Hirigune Vitoria: Gobierno Vasco (Eusko Jaularitza), España.
- Gomez, P.J.M., A. Ruiz de Apodaca., C. Rebollo y J. Azcarate. 2001. European policy on biodegradable waste: A management perspectiva. In: *Specialised conference on sludge regulation, treatment,*

International Wader Association (IWA)-UNAM-UAM: Acapulco, Mexico. 2001:21-29.

Harmel R.D., E.R. Zartman, C., Mouron., B.D. Wester, E.R. Sosebee., 1997. Modeling ammonia volatilization from biosolids applied to semiarid rangeland. Soil Sci Soc Am J 1997;61:1794-1798.

Harris-Pierse, R.L., E.F. Redente., K.A. Barbarick., 1993. The effect of sewage sludge application on native rangeland soil and vegetation: Fort Collins-Meadow Springs Ranch. CO. Agric Exp State Univ Tech Report TR93-6.

Harry, M. Freeman., 1992. Manual de Prevención de la Contaminación, editorial Mc GRAW-HILL. Pag. 635-645.

Health, G., 2006. (En línea) <http://www.Slopublicheald.org-enviromental-public-spanish>. PDF, P367-372. 2004. (Consulta 11 septiembre de 2006)

Howar, 2004. (En línea) Uso del agua. Pagina Ciencias del agua, recursos EPA, USGS.,(<http://water.usgs.gov/gotita/wuww.html>, mail:<http://water.usgs.gov>) (Consulta 23 Agosto de 2006)

SAGARPA, 2006. (En línea): [http://www.sagan-gea.org/hojared\\_AGUA/paginas/8agua.html](http://www.sagan-gea.org/hojared_AGUA/paginas/8agua.html) (Consulta 12 Septiembre de 2006).

Instituto tecnológico Geominero de España, 1995. Contaminación y depuración de suelo. Madrid: instituto geológico minero de España.

Irwin, M.S., J.Thomas., C. Young, 2002. (En línea) Enviromental Scientis/Rutgers; Enviromental-Challenge. Enviromental Systems-Balestie & Balestie Ingenieros/C.T.I. S.A. ([www.biorremediacion.info](http://www.biorremediacion.info)) (Consulta 14 Diciembre de 2006).

ITSEMAP, 1994. Ambiental Implicación ambiental de la incineración de residuos urbanos, hospitalarios / Itsemap Ambiental Madrid España.

- Jiménez-Beltrán, D., F Lora., Rubens-Sette, 1996. Tratamiento de aguas Residuales Pág. 11-14 Editorial Reverté S.A
- Jurado-Guerra, P. 2000. Effects of biosolids and an inorganic mulch on soil-plant relationships in two Chihuahuan desert grasslands Lubbock, Texas, USA. Texas Tech University, (Ph. D Dissertation).
- Jurado, P. y B., Wester, 2001. (en línea) Effect of biosolids on tobosagrass growth in the Chihuahuan desert. Journal of Range Management, Volumen 54:89-95. (<http://uvalde.tamu.edu/jrm/jan01/juradosp.htm>) (Consulta 25 Octubre de 2006).
- Lenntech. 2001. (En línea) Agua residual y purificación del aire. Holding B.V. Rotterdamseweg 402 M 2629 HH Delft, Holanda, España, México y Estados Unidos. e-mail: [info@lenntech.com](mailto:info@lenntech.com) (Consulta Noviembre de 2006)
- Mata-Gonzalez, R. 1999. Influence of biosolids application on growth, nitrogen uptake, and photosynthesis of two desert grasses, Lubbock, Texas, USA. Texas Tech University. (Ph. D. Diseertation).
- Moctezuma-Barragán, P., J. Cardoso-Martínez y O. MC Monroy-Hermosillo, 2002. Situación actual y perspectivas del agua en México en el nuevo milenio mexicano, México. UAM/Ediciones y Gráficos Eón.
- Moffet, A.C., G.C.Villalobos., C.J.M. Avila., S.A. Macko., H.R. Karlson, 2005. Stable isotope analysis for tracing biosolid-derived N: An example from cattle grazing biosolids-amended range. In: 16<sup>th</sup> Annual residuals and biosolids management conference. Water Environment Federation 2002:15.

- Moffet, CA. 2001. Quantity and quality of runoff from two biosolids amended Chihuahuan desert: Effects on soil physical properties. *Arid Land Res Manage* 2001;15:233-244.
- Lú-Chau, T., 1997. Biodegradación y biorremediación Principales microorganismos degradadores de petróleo. Dpto. de Ingeniería Química Instituto De Investigaciones Tecnológicas Universidad de Santiago de Compostela, España.
- Outwater, A.B. 1994. Reuse of sludge and minor wastewater residuals. Boca Raton, Florida, USA: Lewis Publishers,.
- Pillai, S.D., K.W. Widmer., S.E. Dowd., S.C. Ricke, 1996. Occurrence of airborne bacteria and pathogen indicator during land application of sewage sludge. *Appl Environ Microbiol*;62:296-299.
- Prave P.U., W.Faust,. D.A. Sittig y V.C.H. Sukatsch, 1997. Fundamentals of biotechnology.
- Randy, H., A. Schroeder, I. Verónica., Domínguez-Rodríguez y L. García-Hernández. 1999. Potencial de la biorremediación de suelo y agua impactados por petróleo en el trópico mexicano. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco UJAT. Villahermosa-Cárdenas, Villahermosa, Tabasco, México. e-mail: susan@mpsnet.com.mx
- Rivas-De Pablo Joan y R. Sans-FonfríaS, 1998. Ingeniería Ambiental, Contaminación y tratamientos, Alfaomega (lugo) marcombo PRODUCTICA México; Pág. 70-93.
- SEMARNAT, 2003. (en línea) Normas Oficiales Vigentes [www.Semarnat.gob.mx](http://www.Semarnat.gob.mx). (Consulta Octubre del 2003).

- Seoanez-Calvo M., Lic. C. B., I. Angulo-Agrado, 1995. Aguas Residuales Urbanas (tratamiento natural de bajo costo y aprovechamiento) Pág. 28-32.
- Servicios del Departamento de Salud Publica. Salud ambiental del Condado de San Luis Obispo, 2156 Sierra Way, San Luis Obispo, CA. U.S.A.
- Susana.1997. El reto del medio ambiente: conflictos e intereses en la política. Madrid: Alianza Editorial, 97 pp.
- Taylor, J. 1995. Guía de simulación y de juegos para la educación ambiental bilbao: UNESCO, 1995.
- Trejo-Vázquez, R. 2000. Procesamiento de la basura urbana, composteo desinfección biológica, primera edición Trillas. México D.F.
- Tisdale, S.L., W.L. Nelson., J.D. Beaton y J.L. Haxlin, 1993. Soil fertility and fertilizers. Quinta edición Upper Saddle River, New Jersey, USA; Prentice Hall; U.S.A.
- U.S. Environmental Protection Agency, 1996. Part 503-Standards for the use or disposal of sewage sludge. Office of Solid Waste. U.S.A.
- U.S. Environmental Protection Agency, 1997. Environmental regulations and technology: Use and disposal of municipal wastewater sludge. Washington, D.C. EPA625/10-84-003;1997:1-76.
- U.S. Environmental Protection Agency, 1999. Biosolids generation , use, and disposal in the United States. Office of Solid Waste. EPA-530-R-99-009.
- Universidad de Navarra España UNE, 1996. Anuario Internacional de Estadísticas sobre Vertidos Petrolíferos de 1996. Estadísticas superiores de ingenieros industriales.

Villalobos, G.C., D.B. Wester., E.B. Fish., R.E. Zarmant., R.E. Sosobee y B.L. Harris, 1997. Effect of surface application of municipal biosolids on blowing dust and soil particulate matter movement. In: Basic and applied research on the beneficial use of biosolids on the Sierra Blanca ranch. Depts Range Wildlife Manage and Plant soil Sci, Texas Tech University, Lubbock, TX.

Vázquez-Torre, G., 1993. Ecología y formación ambiental México: Mcgraw-Hill de España, S.A.

Walter, I. F. Martínez y G. Cuevas. 2002. Dinamica de los metales en un suelo degradado enmendado con Residuos Urbanos., Departamento de Medio Ambiente, INIA; Madrid, España.

Walton, M. J.E. Herrick., R.P. Gibbens., M.D. Remmenga, 2001. Persistence of municipal biosolids in a Chihuahuan Desert rangeland 18 years after application. Arid Land Research Management 2001;15,223-232.

White, C.S., S.R. Loftin., R. Aguilar, 1997. Application of biosolids to degraded semiarid rangeland: Nine-year responses. J Environ Qual 1997;26;1663-1671.

Whitford, W.G., E.F. Aldon., D.W. Freckman., Y. Steinberger y L.W. Parker, 1990. Effects of organic amendments on soil biota on a degraded rangeland. J Range Manage 1990;42:56-60.

