



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES

MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES

**USO DE PLANTAS NATIVAS PARA LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA
DEL PANTANO CONTAMINADO POR HIDROCARBUROS
EN SANTA ALEJANDRINA, MINATITLÁN, VER., MÉX.**

TESIS

**COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS EN
CIENCIAS FORESTALES**

PRESENTA:

MARTHA REYES RAMOS

Chapingo, Estado de México.

Diciembre de 2005.

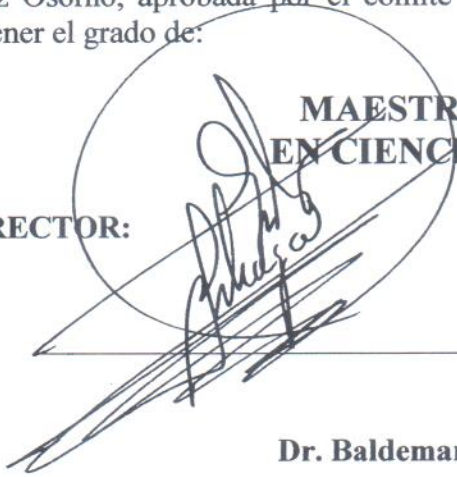


BIBLIOTECA DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES

La presente investigación titulada: **Uso de plantas nativas para la restauración ecológica del pantano contaminado por hidrocarburos en Santa Alejandrina, Minatitlán, Ver., Méx.**, realizada por **Martha Reyes Ramos**, bajo la dirección de Dr. Baldemar Arteaga Martínez, asesorada por M.C. Edmundo Robledo Santoyo, M.C. Langen Corlay Chee, Dr. J. Carmen Ayala Sosa, Dr. Fernando Zavala Chávez, , M.C. Enrique Guizar Nolasco Dr. Roger Armando Antonio Oreyana Lanza y M.C. Agustina Díaz Osorno, aprobada por el comité revisor y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DIRECTOR:

**MAESTRA EN CIENCIAS
EN CIENCIAS FORESTALES**



Dr. Baldemar Arteaga Martínez

ASESOR:



M.C. Edmundo Robledo Santoyo

ASESOR:



Dr. Enrique Serrano Gálvez

Chapingo, Méx. Diciembre 2005



AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo, mi segunda casa, por la oportunidad de abrirme sus puertas a través de cada una de las Maestras (os), Doctoras (res), trabajadores de oficina, bibliotecarios, laboratoristas, intendentes y chóferes que apoyaron la investigación en todas sus etapas.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por acreditar y seguir respaldando al Posgrado en Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma Chapingo.

A la Comisión Nacional Forestal, por su apoyo e interés en la culminación de esta investigación, en especial al Dr. Juan José Jiménez, por sus opiniones tan oportunas.

Al Dr. Diodoro Granados, por su valiosa aportación en la etapa inicial de esta investigación.

Al Dr. Roger Orellana del Centro de Investigaciones de Yucatán (CYCY), por su apoyo en el planteamiento de la metodología de campo para el análisis sucesional de la vegetación.

Al Dr. Baldemar Arteaga, por su dirección y tiempo dedicado para las correcciones de la investigación.

Al M.C. Enrique Guizar Nolasco y al Dr. Fernando Zavala Chávez por sus atinadas correcciones, sugerencias y observaciones referentes a los listados florísticos y en la determinación de las formas de vida de la vegetación del pantano de Santa Alejandrina.

Al Herbario Nacional de la Universidad Autónoma de México, por sus facilidades en la validación e identificación botánica de las especies, a cada uno de los especialistas por familia taxonómica.

Al Herbario de la UAM – Iztapalapa, a cargo del Dr. Adolfo Espejo Serna, por la revisión de las monocotiledoneas.

Al Herbario de Preparatoria Agrícola a cargo la M.C. Agustina Díaz Osorno, en especial por infundirme que la correcta identificación botánica es una herramienta primordial para la restauración ecológica.

Herbario de la División de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma Chapingo, a cargo del M.C. Guizar Nolasco por su orientación para la identificación de la colecta botánica.

A la Dra. Nelly Diego, por su tiempo dedicado a la identificación de los ejemplares de la familia Cyperaceae.





AGRADECIMIENTOS

Al Laboratorio de Microbiología a cargo de la M.C. Langen Corlay Chee y del Laboratorio de Fertilidad de suelos a cargo del M.C. Edmundo Martínez Flores del Departamento de Suelos, por las facilidades para la colecta de muestras de suelo y plantas en el área de estudio; así como para la determinación de los análisis químicos y microbiológicos respectivos.

A los Técnicos Laboratoristas Sr. Gabriel Vega Ruíz del laboratorio de Análisis Químico y al Sr. Anastasio Miranda Velásquez del laboratorio de Microbiología por su tiempo dedicado a esta investigación y sobre todo por compartirme su experiencia.

Al M.C. Javier Santillán Pérez, por la oportunidad de convivir en su espacio, sus sabios consejos, sus incansables ánimos de lucha y por las aportaciones técnicas a este documento.

Al M.C. J. Carmen Ayala Sosa, por enseñarme analizar y buscar nuevas preguntas y responderlas entorno a la problemática ambiental en mi país. Pero ante todo por creer en mí y corregirme.

Al Ing. Reynaldo Contreras Peralta por su apoyo y paciencia para la culminación de la investigación.



DEDICATORIA

Esta tesis esta dedicada:

A Dios, por sentirme viva cada día, por permitirme tener sueños que se han transformado en retos y ahora en logros. Esta es su victoria.

A mi hijo Josué, quien es la personita que motiva mi vida y me enseña a descubrir, explorar, admirar y sonreír ante las pequeñas maravillas cotidianas que nos ofrece la vida. Gracias por tu paciencia, tu amor y tu empeño por vivir. Muy pronto aprenderás a leer y estar a tu lado en tus logros son y serán mucho más placenteros que cualquier cosa.

A mi padre †, aunque ya no estas te encargaste de que a las personas les dejaras muy buenos recuerdos, así pude conocerte y aprendí a tomar decisiones con la fortaleza con la que un día partiste. Me he esforzado y es cierto he tenido que trabajar al doble más que mi hermano, uno por ser mujer y la otra por la misma vida. Pero sigo en el camino y vivo cada día esperando construir y servir hasta que un día nos encontremos.

A cada una de mis maestras y maestros que dentro y fuera de las aulas me enseñaron ante todo la honestidad y humildad en todo lo que aprendí y seguiré adquiriendo con la experiencia, no dejaré de prepararme: "El conocimiento da seguridad".

Agradezco a mi madre y mi hermano por apoyarme al cuidado de mi hijo en la etapa académica. Así como a la Sra. Rosa María Campos Padilla por su esmero y cuidados a Josué que permitieron realizar la investigación con tranquilidad.

A Yadir por darme ánimos y apoyarme en los momentos más difíciles en los que me he encontrado.

A mis amigos: Adrián, Cob, Renato, Elia, José, Mauricio, Víctor y Rafael. Aunque no tengo la oportunidad de tenerlos tan cerca, agradezco a la vida por haberlos conocido y ser protagonistas de muchas aventuras que podremos platicarles a nuestros nietos.

DATOS BIOGRÁFICOS

Originaria de Puebla, Pue. Realizó sus estudios básicos en la Prim. Of. "Pacheco y Henning" y en la Esc. Sec. Of. "Héroes de la Reforma"; el bachillerato lo estudio en el "Centro Escolar José María Morelos y Pavón", con especialidad en electrónica. Con su interés por las ciencias exactas y la biología decidió estudiar la carrera de Ingeniero Forestal en la Universidad Autónoma Chapingo, la cual culminó con la tesis denominada: "Estudio de problemática en la producción y comercialización de artesanías en unidad familiar en Santa Catarina del Monte, Texcoco, Edo. de México". El servicio social, lo realizó en el Ejido de Nueva Vaquería, Municipio de Calcahualco, Ver. en inventario forestal.

Durante su estancia en Chapingo fue Secretaria de Actividades Culturales y Presidente de la Asociación del Estado de Puebla en un período de tres años. Participo como ayudantía académica de maestros del CIESSTAAM y de la sala de computo de la DICIFO.

La experiencia laboral ha sido en actividades relacionadas a la evaluación de plantaciones forestales en el ejido de Laguna Kaná, Carrillo Puerto, Quintana Roo. En el Vivero de San Luis Tlaxialtemalco- CORENA, con la producción en contenedor de *P. hartwegii*, *Abies religiosa*, *Alnus firmifolia* y *P. Montezumae*. Al darse cuenta que necesitaba de mayores herramientas para poder inferir en proyectos relacionados con la conservación y restauración ecológica, ingresa a la maestría, enfocando todos sus esfuerzos en estos temas.

A través de la ONU-University of Peace e INWENT es seleccionada por parte de su país al Seminario internacional: "El Buen Manejo de los Recursos Forestales Latinoamericanos, experiencias, alternativas y desafíos", realizado en San José, Costa Rica en octubre del 2003. Como resultado del Seminario Internacional, llega a México sensibilizada especialmente hacia la motivación y respaldo técnico a los productores forestales e inicia con su participación en talleres de Evaluación Rural Participativa (ERP'S) a través de PROCYMAF-CONAFOR en el Estado de Jalisco.

Actualmente ha realizado estudios de conservación de Áreas de Protección Ecológica en la Ciudad de México, así como Evaluaciones de Impacto Ambiental y Estudios Técnicos Justificativos para cambio de uso del suelo en los Estados de Colima e Hidalgo.

LISTA DE ACRÓNIMOS

ABREVIATURA	DESCRIPCIÓN
APEG	Reactivo Polietilén glicol alcalino
BPCs	Bifenilos policlorados
BTX	Sitios contaminados con Benceno, Tolueno y Xilenos
COVs	Emisión de Compuestos Orgánicos volátiles no halogenados en suelos, sedimentos y lodos
CRETIB	Corrosividad, Reactividad, Explosividad, Toxicidad, Inflamabilidad y Biológico-Infecioso
CONACYT	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
DICIFO	División de Ciencias Forestales
DT	Desorción Térmica
DDT	Dicloro- Difenil- Triclorometano
Ev	Emisiones vehiculares
HTPs ó TPH	Hidrocarburos totales del petróleo
HPA's	Hidrocarburos policíclicos aromáticos
HAP	Extracción de vapores
HMA	Hongos micorrícicos arbusculares
INE	Instituto Nacional de Ecología
<i>in situ</i>	Tecnología de recuperación de sitios contaminados sin excavar el terreno
LAU	Licencia ambiental única
LGEEPA	Ley General del equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente
LP	Gas licuado
Mgpb	Microalgas
NOM	Norma Oficial Mexicana
- OH	Grupo hidroxílico
<i>on site</i>	Tecnología de recuperación de sitios contaminados se excava el terreno y se trata el suelo en el mismo emplazamiento
<i>off site</i>	Tecnología de recuperación de sitios contaminados se excava el terreno y se trata el suelo en otro sitio
pH	Potencial Hidrógeno
PEMEX	Petróleos Mexicanos
PCE	Halo respiración de cloroetenos
ppm	Partes por millón
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
TCE	Triclorotileno
TQ	Tratamiento químico
USEPA	Norma Federal de los Estados Unidos de América
VAM	Micorrizas vesícula-arbuscular

RESUMEN

De acuerdo a la información de PEMEX (1998), dos de los lugares más contaminados por hidrocarburos a nivel nacional son la Refinería Lázaro Cárdenas y el pantano de Santa Alejandrina, Minatitlán, Ver. Actualmente, en el pantano se observa una colonización de una flora particular. Para atender los procesos mediante los cuales esta flora es capaz de crecer en este ambiente contaminado, se definieron cinco tipos de asociaciones vegetales considerando su altura, distribución en el área de estudio, su diversidad y los desechos de hidrocarburos de la Refinería Lázaro Cárdenas. Se realizaron colectas botánicas en dos años consecutivos en el pantano. En el último año, por cada asociación se tomaron ocho sitios de 4 por 4 m, determinados por el Método del Cuadrado Mínimo, se registró la información ecológica más relevante: especie, altura, frecuencia y cobertura, así mismo se tomó una planta dominante del sitio con raíz y una muestra de sustrato.

Se obtuvo un listado florístico con 30 familias y 53 especies de plantas que habitan en el pantano contaminado por hidrocarburos, se clasificaron por sus formas de vida, basándose en Raunkier (1905) y modificado para las formas de vida acuáticas. Por su diversidad, se determinó que la comunidad herbácea dominante es el tular, cuya característica define al pantano en las áreas fangosas, encontrándose en asociación *Panicum elephantipes*. Las especies codominantes son *Polygonum punctatum*, *Heliconia latispatha* e *Hydrocotyle bonariensis*. *Cyperus elegans*, *Cyperus surinamensis*, *Echinochloa walteri* y *Pontederia sagittata*, conforman un 30% de la densidad total del pantano.

En los análisis del sustrato la materia orgánica, se considera sobreestimada debido a los compuestos orgánicos que se encuentran en la conformación del hidrocarburo. La disponibilidad de elementos esenciales disminuye en las primeras asociaciones y aumenta en las dos últimas debido al incremento del pH.

El comportamiento del hidrocarburo en el humedal, permanece en forma de una capa, a medida que disminuye el nivel freático del hidrocarburo invade el suelo. En las últimas asociaciones vegetales el suelo presenta características arcillo-arenosas, debido a que el pantano colinda en el suelo con el río Coatzacoalcos. Se encontraron concentraciones elevadas de Hierro, Cobre, Zinc y Manganeseo en las primeras tres asociaciones vegetales en el suelo. La presencia de vegetación influye directamente en el aumento de la actividad microbiana en el suelo contaminado y disminuye la actividad microbiológica en el contaminante de hidrocarburos de petróleo sin cobertura vegetal.

Se determinó la presencia de micorrizas arbusculares en el pantano de Santa Alejandrina. La abundancia está definida por la dinámica del pantano ya que en época de sequía solo las partes bajas del humedal permanecen inundadas y en época de lluvias aumenta el nivel de agua inundándose las zonas secas, esto permite el desplazamiento de las esporas micorrícicas en las cinco asociaciones. Aunque debido a la abundante presencia de ciperáceas en el pantano, la población micorrícica no es tan elevada como en las asociaciones en las que la diversidad de especies suprime a esta familia, estudios han indicado que no hay asociación micorrícica con ciperáceas. Sin embargo, la colonización micorrícica se presenta en las tres últimas asociaciones, así mismo se encontró la presencia de esporas micorrícicas que van en aumento en las tres últimas asociaciones vegetales.

En base al diagnóstico, se hace una propuesta de restauración ecológica a través de la cobertura, abundancia y frecuencia de las especies nativas por asociación vegetal con la finalidad de acortar las etapas sucesionales y fomentar la revegetación del sitio estudiado.

Palabras clave: Restauración ecológica, fitorremediación, pantano, legislación ambiental, hidrocarburos, contaminación, micorrizas.

ABSTRACT

According to the information from PEMEX (1998), two of the localities most polluted by hydrocarbons at the national level are the refinery Lázaro Cardenas and the marsh of Santa Alejandrina, Minatitlan, Veracruz, Mexico.

It is presently possible to observe the colonization of a particular flora in order to understand the processes by which it is able to grow in this polluted environment. Five types of vegetative associations were defined with regards to their height, distribution within the area under study, diversity and the hydrocarbon waste from the Lázaro Cardenas refinery. Botanical collections in the marsh were made for two consecutive years. During the last year, for every association, eight 4 X 4 m sites were made as determined by the "Minimum Square Method" and the most relevant ecological information was noted: species; height; frequency; and coverage. A dominant plant from the site was uprooted and the substratum was sampled as well.

A listing of the flora of 30 families and 53 plant species which inhabit the marsh polluted by hydrocarbons was obtained. These were classified according to their life form based on Raunkier (1905) and modified with regards to aquatic life. Due to their diversity, it was determined that the dominant herbaceous community was the tular, whose characteristics define the marsh in the muddy areas, in association with *Polygonum punctatum*, *Heliconia latispatha* and *Hydrocotyle bonariensis*. *Cyperus elegans*, *Cyperus surinamensis*, *Echinochloa walteri* and *Pontederia sagittata*, encompassing 30% of the total density of the marsh.

The organic matter is considered overestimated in the analysis of the substratum due to the organic compounds that are composed of hydrocarbons. The availability of essential elements diminished in the first associations and increases in the last two due to an increase in pH.

The hydrocarbons in the swamp behave as a layer, as the phreatic level of the hydrocarbon penetrates the soil. The soil presents sandy clay characteristics in the last vegetative association due to the fact that the marshland is adjacent to the Coatzacoalcos River. High concentration levels of iron, copper, zinc and magnesium were found in the first vegetative associations in the soil. The presence of vegetation directly influences the increase in microbial activity in the polluting oil hydrocarbons without vegetative coverage.

Arbuscular mycorrhizas were found in the marshes of Santa Alejandrina. It is believed that this abundance is defined by marsh dynamics since during the dry season, only the lower parts of the swamp remain flooded, while during the rainy season, the water level of the dry zones increase, thereby flooding the dry areas. This permits the diffusion of the five associations of mycorrhizal spores. Although due to the abundance of cyperaceous in the marsh, the mycorrhizal population is not as high as in the association in which the species diversity suppresses this family; studies indicate that there is no mycorrhizal affiliation with the cyperaceous. Nevertheless, Mycorrhizal colonization appears in the last three associations. The increasingly elevated presences of mycorrhizal spores were also found in the last three associations.

On the basis of the diagnosis, an ecological restoration proposal is made of coverage, abundance, and the frequency of native species through vegetative association in order to shorten the subsequent stages and to encourage the revegetation of the site under study.

Key words: Ecological restoration, phytoremediation, marsh, environmental legislation, hydrocarbons, pollution, mycorrhizas

¹ Autor

CONTENIDO

Capítulo	Página
APROBACIÓN DE LA TESIS DE GRADO.....	i
AGRADECIMIENTOS	ii
DEDICATORIA.....	iv
DATOS BIOGRÁFICOS.....	v
LISTA DE ACRÓNIMOS.....	vi
RESUMEN.....	vii
ABSTRAC.....	vii
CONTENIDO	viii
INDICE DE FIGURA.....	xi
INDICE DE CUADROS	xiii
1. INTRODUCCIÓN.....	14
1.1. OBJETIVOS	15
1.1.1. Objetivo general.....	15
1.1.2. Objetivos particulares	15
1.1.3. Hipótesis	16
2. REVISIÓN DE LITERATURA	16
2.1. Historia de los hidrocarburos	16
2.1.1. Origen del petróleo.....	17
2.1.2. Descripción del petróleo	18
2.1.3. Composición del petróleo	18
2.1.4. Proceso de refinación	19
2.1.5. Industrialización de los hidrocarburos en México	23
2.1.6. Legislación ambiental en materia de hidrocarburos.....	23
2.1.7. Contaminación de hidrocarburos en el suelo	30
2.1.8. Efectos en las plantas por la contaminación de hidrocarburos en el suelo	32
2.1.9. Recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos.....	33
2.1.10. Impacto ambiental de los hidrocarburos	33
2.1.11. Procesos de limpieza de suelos contaminados	36
2.1.12. Principales tecnologías para la eliminación de contaminantes.....	36
2.1.13. Tecnologías para la recuperación de sitios contaminados.....	37
2.1.14. Tecnologías de restauración ambiental	38
2.1.15. Descripción de tecnologías <i>ex situ</i> e <i>in situ</i> para control, recuperación o restauración de sitios contaminados	38
2.2. Remediación	42
2.2.1. Concepto de remediación.....	42
2.2.2. Remediación en México.....	43
2.2.3. Elementos para la elección de una técnica de remediación.....	45
2.2.4. Clasificación de las técnicas de remediación	46
2.2.5. Tecnologías de remediación utilizadas en México.....	47
2.2.6. Elementos que definen el éxito de la remediación	51
2.3. Biorremediación	51
2.3.1. Concepto de biorremediación	51
2.3.2. Ventaja y desventajas de biorremediación	52
2.3.3. Factores que influyen en la biorremediación de sitios contaminados con petróleo.....	53

2.3.4. Microorganismos degradadores de petróleo o hidrocarburos.....	56
2.3.5. Procesos de la biorremediación.....	58
2.3.6. Tecnologías de biorremediación	59
2.3.7. Estudios y proyectos de biorremediación en México.....	60
2.4. Biorrestauración.....	61
2.4.1. Ventajas y desventajas de la biorrestauración.....	62
2.4.2. Biorrestauración <i>in situ</i> y <i>ex situ</i>	62
2.5. Fitorremediación	65
2.5.1. Historia de la fitorremediación.....	66
2.5.2. Tecnologías de fitorremediación.....	68
2.5.3. Fitorremediación acuática.....	73
2.5.4. Tipos de plantas acuáticas para la fitorremediación.....	74
2.5.5. Criterios de selección de plantas para la fitorremediación.....	75
2.5.6. Dinámica del proceso de fitorremediación acuática en tratamiento de aguas residuales	75
2.5.7. La fitorremediación en México.....	77
2.6. Restauración ecológica	79
2.6.1. Concepto de restauración ecológica.....	79
2.6.2. Restauración ecológica con especies nativas	80
2.6.3. Técnica para la restauración de suelos perturbados	84
2.6.4. Legislación ambiental en México con respecto a la restauración ecológica.	84
2.7. Restauración de humedales.....	88
2.8. Micorriza arbuscular	96
2.8.1. Efectos de la micorriza arbuscular en las plantas.....	97
2.8.2. Manejo de las micorizas para la revegetación en ambientes perturbados	101
3. MATERIALES Y MÉTODOS	106
3.1. Medio físico y geográfico	106
3.1.1 Localización geográfica	106
3.1.2 Hidrografía.....	111
3.1.3 Clima.....	111
3.1.4 Orografía.....	113
3.1.5 Flora.....	113
3.1.6 Fauna.....	114
3.1.7 Agricultura y Ganadería.....	114
3.2. Metodología	114
3.2.1. Definición del tamaño del área de muestreo	115
3.2.2. Colecta botánica e identificación taxonómica.....	116
3.2.3. Análisis Ecológico	116
3.2.3.1. Clasificación de formas de vida adaptada a humedales	117
3.2.3.2. Análisis estadístico.....	118
3.2.3.3. Cálculo de indicadores ecológicos.	119
3.2.4. Análisis químico de sustrato de hidrocarburos y agua.....	119
3.2.4.1. Metodologías para la determinación del análisis químico.....	120
3.2.4.2. Análisis estadístico.....	122
3.2.5. Análisis microbiológico	122
3.2.5.1. Peso seco de la raíz	123
3.2.5.2. Determinación de la actividad microbiana del sustrato contaminado	123

3.2.5.3. Evaluación de la colonización de la micorriza arbuscular	124
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	127
4.1. Análisis Ecológico.....	127
4.1.1. Dinámica del humedal contaminado por hidrocarburos.....	127
4.1.2. Listas preliminares florísticas del pantano de Santa Alejandrina.....	131
4.1.3. Listado florístico del pantano de Santa Alejandrina.....	135
4.1.4. Formas de vida de Raunkier adaptada al pantano	136
4.1.5. Histograma biológico conforme a la clasificación de formas de vida.....	138
4.1.6. Análisis sucesional del pantano de Santa Alejandrina, Minatitlán, Ver.....	139
4.1.7. Densidad de especies en el pantano de Sta. Alejandrina, Minatitlán, Ver	143
4.1.8. Análisis de varianza para bloques al azar y comparación de medias (Tukey)	145
4.1.9. Análisis de cluster entre sitios (Dendrogramas).....	146
4.1.10. Análisis del índice de Shannon-Wiener para el pantano	148
4.1.11. Cobertura.....	150
4.2. Descripción de las asociaciones vegetales en el Pantano de Santa Alejandrina, Minatitlán, Ver	152
4.2.1. Asociación vegetal 1	152
4.2.2. Asociación vegetal 2	157
4.2.3. Asociación vegetal 3	160
4.2.4. Asociación vegetal 4	164
4.2.5. Asociación vegetal 5	168
4.3. Análisis químico del sustrato contaminado por hidrocarburos	171
4.3.1. Propiedades físicas	172
4.3.1.1. Materia Orgánica.....	172
4.3.1.2. Condiciones limitantes	173
4.3.1.3. Profundidad del suelo.....	173
4.3.1.4. Salinidad	174
4.3.2. Características químicas.....	175
4.3.2.1. Elementos primarios N, P y K.....	175
4.3.2.2. Elementos secundarios calcio y magnesio	176
4.3.2.3. Micronutrientes Fe, Cu, Zn y Mn.....	177
4.4. Análisis de Agua.....	178
4.5. Análisis Microbiológico	178
4.5.1. Contenido de Humedad en el sustrato de hidrocarburos del petróleo	179
4.5.2. Determinación de actividad microbiana.....	180
4.5.3. Evaluación de la colonización de la micorriza arbuscular	181
4.5.3.1. Listado de plantas colectadas para el análisis microbiológico.	181
4.5.3.2. Colonización Total micorrícica por asociaciones vegetales.....	182
4.5.3.3. Colonización Vesicular – Micelio por asociaciones en el pantano de Santa Alejandrina.....	183
4.5.3.4. Monitoreo de esporas	187
5. PROPUESTA DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA PARA EL PANTANO CONTAMINADO POR HIDROCARBUROS EN SANTA ALEJANDRINA, MINATITLÁN, VER.	191
6. CONCLUSIONES.....	198
7. RECOMENDACIONES	200
8. LITERATURA CITADA	201

INDICE DE FIGURA

Figura 1. Principales fracciones del crudo (Chow., 1998)	21
Figura 2. Destino de los hidrocarburos en el suelo McGill <i>et al.</i> , 1981.....	31
Figura 3. Deshalogenación, remediación <i>ex situ</i> (Peña <i>et al.</i> , 2001).....	40
Figura 4. Tecnologías de remediación de suelos utilizadas en México.	48
Figura 5. Triangulo de la biodegradación (Suthersan, 1997).....	54
Figura 6.- Proceso de Bioremediación <i>in situ</i> de agua y suelo.....	63
Figura 7. Biorestauración <i>ex situ</i> de agua y suelo (Peña <i>et al.</i> , 2001)	64
Figura 8. Esquema de fitorremediación (Ketchum, 2003).....	65
Figura 9. Enzimas producidas en la rizosfera.....	72
Figura 10. Ejemplo de Arbúsculos, Brundrett <i>et al.</i> , (1996).....	96
Figura 11. Vesículas con hifas Brundrett <i>et al.</i> , (1996).....	97
Figura 12. Ubicación geográfica de las Refinerías-PEMEX en México.	107
Figura 13. Panorámica del pantano y la refinería Lázaro Cárdenas.	110
Figura 14. Descarga de la refinería al pantano de Santa Alejandrina.....	111
Figura 15. Localización del área de estudio.....	112
Figura 16. Diseño de matriz binaria presencia- ausencia.....	118
Figura 17. Determinación del Nitrógeno inorgánico (método volumétrico).....	120
Figura 18. Canal de desagüe al pantano de Santa Alejandrina.....	122
Figura 19. Nenúfares secos cubriendo al hidrocarburo.	128
Figura 20. Hidrocarburos de desecho cubiertos por nenúfares.	128
Figura 21. Desechos de hidrocarburos incendiándose.	129
Figura 22. Histograma biológico.....	139
Figura 23. Perfil sucesional de la vegetación en el pantano.....	141
Figura 24. Valor de importancia por familia.....	142
Figura 25. Densidad de individuos por especie.....	144
Figura 26. Dendrograma por sitios en las asociaciones vegetales.....	147
Figura 27. Dendrograma entre asociaciones vegetales.....	148
Figura 28. Variación de la heterogeneidad de especies por asociación.	149
Figura 29. Cobertura del pantano de Santa Alejandrina.....	150
Figura 30. Representación de la Asociación 1 con respecto al pantano.....	152
Figura 31. Densidad de individuos por especie en la asociación 1.....	154
Figura 32. Invasión de nenúfares y Ciperáceas.....	155
Figura 33. Cubierta de nenúfares sobre el sustrato de hidrocarburo.....	155
Figura 34. Asociación vegetal 1.....	156
Figura 35. Densidad de individuos por especie en la asociación 1.....	156
Figura 36. Esquema de la asociación 2.....	158
Figura 37. Densidad de individuos por especie en la asociación 2.....	158
Figura 38. Asociación Vegetal 2.....	159
Figura 39. Exposición directa al sol del desecho de hidrocarburos.....	159
Figura 40. Cobertura en porcentaje de la Asociación 2.....	160
Figura 41. Representación de la asociación 3 con respecto al pantano.....	162
Figura 42. Densidad de individuos por especie en la asociación 3.....	162
Figura 43. Asociación vegetal no. 3.....	163
Figura 44. Asociación vegetal 3, mayor diversidad.....	163
Figura 45. Cobertura en porcentaje de la Asociación 3.....	164
Figura 46. Representación de la asociación 4 con respecto al pantano.....	165
Figura 47. Densidad de individuos por especie en la asociación 4.....	166
Figura 48. Asociación vegetal no. 4.....	167
Figura 49. El carrizo es la especie dominante.....	167
Figura 50. Cobertura de la asociación 4.....	168
Figura 51. Representación de la asociación 5 con respecto al pantano.....	169
Figura 52. Densidad de individuos por especie en la asociación 5.....	169
Figura 53. Asociación 5.....	170
Figura 54. Cobertura de la asociación 5.....	171
Figura 55. Contenido de humedad por asociación con sus repeticiones.....	180
Figura 56. Actividad microbiana en el sustrato de hidrocarburos.....	181

Figura 57. Colonización total micorrícica en las asociaciones	182
Figura 58. Colonización de vesículas.....	184
Figura 59. Presencia de vesículas con micelio, zona inferior central.....	185
Figura 60. Esporas de <i>Pithium</i> pequeñas	185
Figura 61. Vesículas con hifas. Parte superior izquierda.	186
Figura 62. Presencia de arbúsculos y micelio.	186
Figura 63. Presencia de arbúsculos con micelio.....	187
Figura 64. Análisis de esporas de micorrizas	188
Figura 65. Matriz de restauración ecológica activa.....	192

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Hidrocarburos en la destilación fraccionada del petróleo	22
Cuadro 2. Normas Oficiales Mexicanas para manejo de residuos	28
Cuadro 3. Normas Oficiales Mexicanas para manejo de Hidrocarburos	29
Cuadro 4. Relación del número total de emergencias ambientales	50
Cuadro 5. Investigaciones y proyectos de biorremediación en México	60
Cuadro 6. Ventajas y desventajas de la Fitorremediación	67
Cuadro 7. Plantas acumuladoras de metales pesados	69
Cuadro 8. Especies vegetales utilizadas en la rehabilitación de suelos	71
Cuadro 9. Enzimas excretadas por las plantas en suelos contaminados	73
Cuadro 10. Plantas acuáticas en el tratamiento de aguas residuales	75
Cuadro 11. Descontaminación en México por medio del uso de plantas.....	78
Cuadro 12. Restauración ecológica realizada en México.....	87
Cuadro 13. Géneros pertenecientes al orden Glomales	98
Cuadro 14. Indicadores del subsector petrolero en Minatitlán.....	109
Cuadro 15. Residuos de la Refinación y Petroquímica (PEMEX)	110
Cuadro 16. Método para el análisis químico del sustrato contaminado por hidrocarburos.....	121
Cuadro 17. Listado de la primera colecta botánica en Sta. Alejandrina	133
Cuadro 18. Listado florístico preliminar de la segunda colecta botánica	134
Cuadro 19. Listado florístico del pantano de Sta. Alejandrina, Minatitlán, Ver por familia.....	135
Cuadro 20. Clasificación de formas de vida del pantano de Santa Alejandrina	137
Cuadro 21. ANOVA para bloques completamente al azar.....	145
Cuadro 22. Comparación de medias por Tukey	145
Cuadro 23. Índice de Shannon-Wiener en el pantano de Sta. Alejandrina	149
Cuadro 24. Índice de Shannon por asociación en el pantano de Santa Alejandrina.....	151
Cuadro 25. Vegetación colonizadora en la asociación vegetal 1	153
Cuadro 26. Vegetación colonizadora en la asociación vegetal 2	157
Cuadro 27. Especies encontradas en la asociación vegetal 3.....	161
Cuadro 28. Vegetación por familia de la Asociación vegetal 4.....	165
Cuadro 29. Concentrado de análisis químicos del sustrato en el pantano de Santa Alejandrina.....	172
Cuadro 30. Clasificación de materia orgánica del sustrato en el pantano de Santa Alejandrina.....	172
Cuadro 31. Clasificación de pH de las muestras colectadas en el pantano de Santa Alejandrina ..	173
Cuadro 32. Profundidad del suelo de las muestras colectadas en el pantano de Santa Alejandrina	174
Cuadro 33. Determinación CE del sustrato en el pantano de Santa Alejandrina.....	175
Cuadro 34. Clasificación de NI de las muestras colectadas en el pantano de Santa Alejandrina.....	175
Cuadro 35. Clasificación de P de las muestras colectadas en el pantano de Santa Alejandrina.....	176
Cuadro 36. Clasificación de K de las muestras colectadas en el pantano de Santa Alejandrina.....	176
Cuadro 37. Clasificación de Ca y Mg de las muestras colectadas en el pantano de Santa Alejandrina	177
Cuadro 38. Cantidad de micronutrientes en las muestras colectadas. Fe, Cu, Zn, Mn.....	177
Cuadro 39. Análisis de agua	178
Cuadro 40. Concentrado de Análisis microbiológico en el pantano de Santa Alejandrina, Minatitlán	179
Cuadro 41. Plantas colectadas en el campo	181
Cuadro 42. Frecuencia relativa por asociación vegetal en el pantano de Santa Alejandrina.....	194
Cuadro 43. Especies para la restauración ecológica en el pantano de Santa Alejandrina, Ver.	195

1. INTRODUCCIÓN

La problemática ambiental del mundo es el resultado de la explotación y el manejo inadecuado de los recursos naturales, en muchos casos debido al desconocimiento prácticamente total de los procesos ecológicos que ocurren en los ecosistemas. Hoy día existen selvas tropicales, bosques templados, bosques xerófilos, cuerpos de agua, ríos, etc., que se encuentran totalmente alterados en su composición y funcionamiento. Ante tal crisis en el ámbito mundial, surge la necesidad de tomar medidas que eviten la desaparición de los ecosistemas, que promuevan su conservación y rehabilitación (Hobbs, 1994).

Cada año, efluentes agrícolas, residuos industriales y accidentes industriales contaminan aguas superficiales, suelos, aire, arroyos y embalses (USEPA, 1997). Por ello, la necesidad de remediar sitios dañados por la contaminación ha estimulado el desarrollo de nuevas tecnologías físicas, químicas y biológicas.

El desarrollo de PEMEX, en el sureste del país ha dado grandes beneficios, pero también se ha descuidado el impacto ambiental y sus repercusiones en la población. Para atender esta realidad, en agosto de 1997 se firmó el acuerdo de Reordenamiento Territorial del Sur del Estado de Veracruz, por el Gobierno Federal Ernesto Zedillo Ponce de León, Gobierno del Estado de Veracruz y PEMEX. En este acuerdo entre otros se incluye la restauración ecológica del arroyo de San Francisco y el pantano de Santa Alejandrina en Minatitlán, así como una reserva ecológica de 590 hectáreas en Ixhuatlán del Sureste en terrenos también donados por PEMEX (Zedillo, 1997).

En Minatitlán, Ver., se localiza la Refinería Lázaro Cárdenas, ubicada al margen del río Coatzacoalcos. En las inmediaciones existe un pantano natural el cual fue contaminando por los desechos de hidrocarburos de la planta, afectando a las comunidades aledañas, principalmente a Santa Alejandrina. La vegetación del pantano era típicamente de un humedal y la de los alrededores de Selva Mediana Perennifolia (Miranda y Hernández,

1963). Actualmente, en el sitio contaminado se puede observar la colonización de una flora particular, diferente a la original. Para entender los procesos mediante los cuales esta flora es capaz de crecer en estos sitios contaminados y para evaluar su utilidad en la restauración de los sitios, es necesario llevar a cabo estudios sobre sus estrategias de colonización, su morfología, así como también algunos elementos que permitan entender las interacciones que hay con el contaminante de petróleo. De esta forma resulta importante identificar taxonómicamente estas especies, realizar un análisis de suelo tanto químico como microbiológico y avanzar en el entendimiento de las capacidades de adaptación de la vegetación, de tal manera que podamos generar un diseño y/o modelo de restauración ecológica del lugar.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo general

Diseñar una propuesta de restauración ecológica mediante el uso de plantas nativas en el pantano Santa Alejandrina contaminado por hidrocarburos en Minatitlán, Veracruz, Méx.

1.1.2. Objetivos particulares

1. Determinar los procesos naturales de sucesión ecológica de la flora invasora y sus estrategias de colonización.
2. Caracterizar los atributos morfológicos y simbióticos de las especies vegetales que permitan su establecimiento como fitorremediadoras en áreas contaminadas por hidrocarburos.
3. Analizar la química del suelo contaminado por desechos de hidrocarburos de la Refinería Lázaro Cárdenas.
4. Determinar la actividad microbiológica del suelo contaminado por hidrocarburos.
5. Valorar la incidencia de colonización de endomicorrizas en las plantas predominantes de cada asociación.
6. Diseñar una propuesta de restauración para el humedal contaminado por hidrocarburos.

1.1.3. Hipótesis

1. Si las plantas nativas del pantano de Santa Alejandrina, Minatitlán, Ver. sobreviven, se reproducen y permiten el establecimiento de nuevas especies sobre los desechos de hidrocarburos aceitosos de la Refinería Lázaro Cárdenas, entonces son plantas fitorremediadoras.
2. Si en las áreas con desechos de hidrocarburos aceitosos es mayor la actividad microbiológica en áreas cubiertas con vegetación que en las áreas desprovistas de ésta, entonces las plantas establecidas son fitoestabilizadoras.
3. Si las especies pioneras se establecen en los desechos de hidrocarburos aceitosos, entonces permiten pueda establecerse el siguiente estrato sucesional.
4. Si se incendian los desechos de hidrocarburos aceitosos, entonces al carbonizarse se forman grietas lo cual permiten que brote a la superficie los desechos de hidrocarburos que no pudieron quemarse y se reinicie el ciclo de combustión, entonces favorece el establecimiento de semillas pioneras para su germinación y fomenta el rebrote de las plantas a través de sus yemas laterales.
5. Si hay presencia de endomicorizas en la vegetación, entonces es un indicador de sucesión ecológica.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Historia de los hidrocarburos

El petróleo se conoce desde la prehistoria. En la época precolombiana los indígenas lo conocían y usaban para impermeabilizar las embarcaciones (Chow, 1998). Las aplicaciones del petróleo hasta mediados del siglo XVIII, fueron muy pocas. En 1895, con la aparición de los primeros automóviles. En vísperas de la primera Guerra Mundial, antes de 1914, ya existían en el mundo más de un millón de vehículos que usaban gasolina (PEMEX, 1988; Chow, 1998).

Posteriormente, se desarrollaron los motores de turbina (jets) empleados hoy en los aviones comerciales, civiles y militares. Estos motores usan el mismo combustible de las

lámparas del siglo pasado, pero con bajo contenido de azufre y baja temperatura de congelación, que se llama turbosina. Desde luego, cuando se introdujeron los aviones de turbina, el uso de la kerosina como combustible de lámparas era casi nulo, debido al descubrimiento de la electricidad, de tal manera que en 1964 cerca del 80% del consumo total de ésta se utilizaba para hacer turbosina.

Otra fracción del petróleo crudo que sirve como energético es la de los gasóleos, que antes de 1910 formaba parte de los aceites pesados que constituían los *desperdicios de las refinerías*. Cuando al fin se logró separar la fracción ligera de los gasóleos, a la que se le denominó diesel, el motor de Rudolph Diesel empezó a encontrar un amplio desarrollo (Chow, 1998). La principal ventaja de los motores diesel en relación a los motores de combustión interna estriba en el hecho de que son más eficientes, ya que producen más trabajo mecánico por cada litro de combustible. Es de todos conocidos que los automóviles sólo aprovechan del 22 al 24% de la energía consumida, mientras que en los motores diesel este aprovechamiento es del 35%. Por lo tanto, estos motores encontraron rápida aplicación en los barcos de la marina militar y mercante, en las locomotoras de los ferrocarriles, en los camiones pesados, y en los tractores agrícolas. A partir de 1970, el petróleo no sólo constituyó el motor del crecimiento de los países capitalistas, sino que también se erigió como una de las principales fuentes de ingresos de los países productores, en su mayoría países en vías de desarrollo (PEMEX, 1998; Hernández, 2002).

2.1.1. Origen del petróleo

Existen tres hipótesis de cómo se formó el petróleo. Se explica que el hidrocarburo nació en una época primitiva de la tierra, cuando caían meteoritos constantemente, mismos que con el tiempo formaron depósitos de petróleo y gas natural. Otra hipótesis establece que el petróleo surgió debido a las grandes temperaturas y reacciones químicas de las rocas (PEMEX, 1998).

La teoría más aceptada es la orgánica, la cual supone que se originó por la descomposición de los restos animales y algas microscópicas acumuladas en el fondo de

las lagunas y en el curso inferior de los ríos. La materia orgánica se cubrió paulatinamente con capas cada vez más gruesas de sedimentos al abrigo de los cuales, en determinadas condiciones de presión, temperatura y tiempo se transformó lentamente en hidrocarburos (Tissot y Welte, 1982; Hernández, 2002).

2.1.2. Descripción del petróleo

El término proviene del latín *petroleum* *petra* (piedra) y *oleum* (aceite), la palabra petróleo significa aceite de piedra. Es un compuesto de hidrocarburos, básicamente una combinación de carbono e hidrógeno. El petróleo es una mezcla de hidrocarburos, compuestos que contienen en su estructura molecular carbono e hidrógeno, principalmente. El número de átomos de carbono y la forma en que están colocados dentro de las moléculas de los diferentes compuestos proporciona al petróleo diferentes propiedades físicas y químicas. Así, los hidrocarburos compuestos por uno a cuatro átomos de carbono son gaseosos, los que contienen de 5 a 20 son líquidos, y los de más de 20 son sólidos a la temperatura ambiente (PEMEX, 1988).

2.1.3. Composición del petróleo

El petróleo crudo varía en su composición, lo cual depende del tipo de yacimiento de donde provenga, pero en promedio podemos considerar que contiene entre 83 - 86% o 76 - 86% de carbono y entre 11 - 13% o 10 - 14% de hidrógeno.

Mientras mayor sea el contenido de carbón en relación al del hidrógeno, mayor es la cantidad de productos pesados que tiene el crudo. Esto depende de la antigüedad y de algunas características de los yacimientos (Chang y Tsao, 1984; Pavia, 1990; Chow, 1998).

En la composición del petróleo crudo también figuran los derivados de azufre, oxígeno, nitrógeno y metales como el fierro, níquel, cromo, vanadio, y cobalto, además del carbono e hidrógeno (Chang y Tsao, 1984; Pavia, 1990; Chow; 1998).

Además, los crudos tienen pequeñas cantidades, del orden de partes por millón, de compuestos con átomos de nitrógeno, o de metales. El petróleo tal y como se extrae de los pozos no sirve como energético ya que requiere de altas temperaturas para arder, pues el crudo en sí está compuesto de hidrocarburos de más de cinco átomos de carbono, es decir, hidrocarburos líquidos. Por lo tanto, para aprovecharlo como energético es necesario separarlo en diferentes fracciones que constituyen los diferentes combustibles como el gasavión, gasolina, turbosina, diesel, gasóleo ligero y gasóleo pesado (Chow, 1998). A temperatura ambiente, los hidrocarburos con cuatro átomos de carbono son de estado gaseoso, de cinco a veinte átomos de carbono son de estados líquidos y con más de veinte átomos de carbono son de estado sólidos (Tissot y Welte, 1982).

El petróleo se encuentra en el subsuelo, impregnado de formaciones de tipo arenoso y calcáreo. Asume los tres estados físicos de la materia: sólido, líquido y gaseoso, según su composición, la temperatura y presión a que se encuentren. Su color varía entre el ámbar y el negro, su densidad es menor que la del agua en estado gaseoso y es inodoro, incoloro e insípido (PEMEX, 1988).

2.1.4. Proceso de refinación

En las refinerías petroleras, se lleva a cabo las separaciones del petróleo en las torres de fraccionamiento o de destilación primaria. Para ello, primero se calienta el crudo a 400°C para que entre vaporizado a la torre de destilación. Aquí los vapores suben a través de pisos o compartimentos que impiden el paso de los líquidos de un nivel a otro. Al ascender por los pisos los vapores se van enfriando.

Este enfriamiento da lugar a que en cada uno de los pisos se vayan condensando distintas fracciones, cada una de las cuales posee una temperatura específica de licuefacción.

Los primeros vapores que se licuan son los del gasóleo pesado a 300 °C aproximadamente, después el gasóleo ligero a 200 °C; a continuación, la kerosina a 175°C, la nafta y por último, la gasolina y los gases combustibles que salen de la torre de

fraccionamiento todavía en forma de vapor a 100 °C. Esta última fracción se envía a otra torre de destilación en donde se separan los gases de la gasolina.

En esta torre de fraccionamiento se destila a la presión atmosférica, o sea, sin presión. Por lo tanto, sólo se pueden separar sin descomponerse los hidrocarburos que contienen de 1 a 20 átomos de carbono.

Para recuperar más combustibles de los residuos de la destilación primaria es necesario pasarlos por otra torre de fraccionamiento que trabaje a alto vacío, o sea a presiones inferiores a la atmosférica para evitar su descomposición térmica, ya que los hidrocarburos se destilarán a más baja temperatura. En la torre de vacío se obtienen sólo dos fracciones, una de destilados y otra de residuos.

De acuerdo al tipo de crudo que se esté procesando, la primera fracción es la que contiene los hidrocarburos que constituyen los aceites lubricantes y las parafinas, y los residuos son los que tienen los asfaltos y el combustóleo pesado (Figura 1).

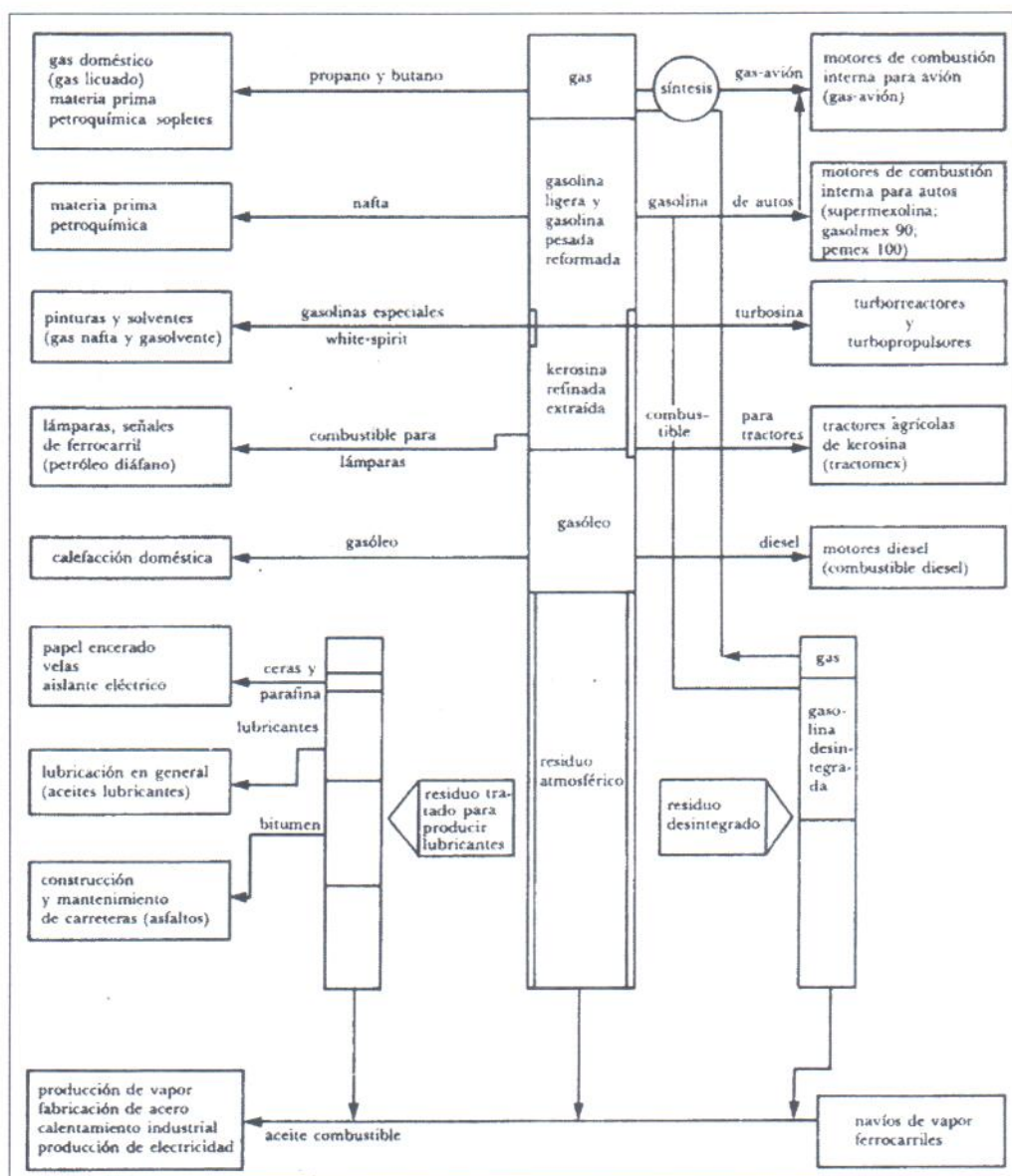


Figura 1. Principales fracciones del crudo (Chow., 1998)

En el Cuadro 1 se describe aproximadamente el número de átomos de carbono que contienen las diferentes fracciones antes mencionadas, se incluyen los gases incondensables y el gas licuado (LP) porque éstos se encuentran disueltos en el crudo que entra a la destilación primaria, a pesar de que se suele eliminarlos al máximo en las torres de despunte que se encuentran antes de precalentar el crudo de fraccionadores.

Cuadro 1. Hidrocarburos en la destilación fraccionada del petróleo

Fracción	Número de átomos de C por molécula
gas incondensable	C ₁ -C ₂
Gas licuado (LP)	C ₃ -C ₄
Gasolina	C ₅ -C ₉
Kerosina	C ₁₀ -C ₁₄
Gasóleo	C ₁₅ -C ₂₃
Lubricantes y parafinas	C ₂₀ -C ₃₅
combustóleo pesado	C ₂₅ -C ₃₅
Asfaltos	> C ₃₉

Fuente: Chow, 1998

De los gases incondensables el metano es el hidrocarburo más ligero, pues contiene sólo un átomo de carbono y cuatro de hidrógeno. El que sigue es el etano, que está compuesto por dos de carbono y seis de hidrógeno.

El primero es el principal componente del gas natural. Se suele vender como combustible en las ciudades, en donde se cuenta con una red de tuberías especiales para su distribución. Este combustible contiene cantidades significativas de etano.

El gas LP es el combustible que se distribuye en cilindros y tanques estacionarios para casas y edificios. Este gas está formado por hidrocarburos de tres y cuatro átomos de carbono denominados propano y butano, respectivamente.

La siguiente fracción está constituida por la gasolina virgen, que se compone de hidrocarburos de cuatro a nueve átomos de carbono, la mayoría de cuyas moléculas están distribuidas en forma lineal, mientras que otras forman ciclos de cinco y seis átomos de carbono. A este tipo de compuestos se les llama parafínicos y cicloparafínicos respectivamente (Saval, 1995).

La fracción que contiene de 10 a 14 átomos de carbono tiene una temperatura de ebullición de 174 a 288 °C, que corresponde a la fracción denominada kerosina, de la cual se extrae el combustible de los aviones de turbina llamado turbosina.

La última fracción que se destila de la torre primaria es el gasóleo, que tiene un intervalo de ebullición de 250 a 310 °C y contiene de 15 a 18 átomos de carbono. De aquí se obtiene el combustible llamado diesel, que, como ya dijimos, sirve para los vehículos

que usan motores diesel como los tractores, locomotoras, camiones y barcos (Saval, 2004).

De los destilados obtenidos al vacío, aquellos que por sus características no se destinen a lubricantes se usarán como materia prima para convertirlos en combustibles ligeros como el gas licuado, la gasolina de alto octano, el diesel, la kerosina y el gasóleo.

El residuo de vacío contiene la fracción de los combustóleos pesados que se usan en las calderas de las termoeléctricas (PEMEX, 1988).

2.1.5. Industrialización de los hidrocarburos en México

En muy pocos años la industria petroquímica ha llegado a ser una de las actividades industriales más importantes para nuestro país. Su importancia deriva no sólo de su participación relativa en el producto interno bruto, que supera el 2%, de su elevada tasa de crecimiento anual, que se encuentra entre los más altos de la industria, o de su alto grado de integración nacional, difícil de superar por otros sectores industriales, sino de la influencia directa que esta industria tiene, a través de sus diversas cadenas productivas, sobre cualquier actividad de la vida moderna (Ortiz, 2001).

2.1.6. Legislación ambiental en materia de hidrocarburos

I. Marco jurídico en materia de protección al ambiente

El marco jurídico en materia ambiental esta dado, en primera instancia, por la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en sus artículos 4,25,27,73 fracción XXIX-G y 115.

De la Carta Magna emana la legislación secundaria, y en particular por su ámbito de competencia, la Ley marco denominada Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al ambiente (LEGEEPA), en su artículo 3 apartado VI y VII indica que los contaminantes se definen como toda materia o energía en cualesquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o

cualquier elemento natural, altere o modifique su composición y condición natural y en el apartado XXXIII referido a la “restauración”, la cual es definida como el conjunto de actividades tendientes a la recuperación y restablecimiento de las condiciones que propician la evolución y continuidad de los procesos naturales.

La LEGEEPA, menciona particularmente para las actividades petroleras:

- 1. Obras hidráulicas**, vías generales de comunicación, oleoductos, gasoductos y carboductos.
- 2. Industria del petróleo**, petroquímica, química, siderúrgica, papelera, azucarera, del cemento y eléctrica.
- 3. Obras o actividades que correspondan a asuntos de competencia federal**, que pueden causar desequilibrios ecológicos graves e irreparables, daños a la salud pública o a los ecosistemas, o rebasar los límites y condiciones establecidos en las disposiciones jurídicas relativas a la preservación del equilibrio ecológico y la protección al ambiente (LGEEPA, 1996).

La protección del suelo queda alineada en el ámbito general sus instrumentos de control, la ordenación ecológica del territorio, la manifestación del impacto ambiental para obras y actividades antes mencionadas, la adopción de medidas de protección en áreas naturales, a través del Instituto Nacional de Ecología (INE) y Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), órganos desconcentrados de la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales (SEMARNAT), en la inspección, vigilancia y aplicación de medidas para la conservación y preservación del ambiente (Díaz, 1995).

En lo relativo al marco normativo de la restauración y conservación de suelos, se observan múltiples deficiencias y contradicciones en diversos aspectos. Además, se identifica un rezago en la generación de normas que permitan un ejercicio eficaz de la acción pública y la orientación para los productores, buscando una congruencia de todo el marco normativo, tomando en cuenta las tendencias internacionales en la materia (Poder Ejecutivo Federal, 1995).

En los siguientes artículos las actividades petroleras no se mencionan, pero se ven involucradas, es el caso del artículo 7 de esta misma ley, señala en el apartado XII, la participación en emergencias y contingencias ambientales, conforme a las políticas y programas de protección civil que al efecto se establezcan.

De acuerdo con el artículo 109 BIS, la Secretaría, en los términos que señalen los reglamentos de esta Ley, deberá integrar un inventario de emisiones atmosféricas, descargas de aguas residuales en cuerpos receptores federales o que se infiltren al subsuelo, materiales y residuos peligrosos de su competencia, coordinar los registros que establezca la Ley y crear un sistema consolidado de información basado en las autorizaciones, licencias o permisos que en la materia deberán otorgarse.

En el artículo 111, se menciona que para controlar, reducir o evitar la contaminación de la atmósfera, la Secretaría tendrá las siguientes facultades como es el de expedir las normas oficiales mexicanas (NOM) que establezcan la calidad ambiental de las distintas áreas, zonas o regiones del territorio nacional, con base en los valores de concentración máxima permisible para la salud pública de contaminantes en el ambiente, determinados por la Secretaría de Salud; en el apartado III, señala expedir las normas oficiales mexicanas que establezcan por contaminante y por fuente de contaminación, los niveles máximos permisibles de emisión de olores, gases así como de partículas sólidas y líquidas a la atmósfera provenientes de fuentes fijas y móviles.

En el capítulo III “Prevención y Control de la Contaminación del Agua y de los Ecosistemas Acuáticos”, en el artículo 117, señala que la prevención y control de la contaminación del agua, es fundamental para evitar que se reduzca su disponibilidad y para proteger los ecosistemas del país, el artículo 118, menciona los criterios para la prevención y control de la contaminación del agua. La expedición de normas oficiales mexicanas (NOM) para el uso, tratamiento y disposición de aguas residuales, para evitar riesgos y daños a la salud pública; el artículo 121, menciona que no podrán descargarse o infiltrarse en cualquier cuerpo o corriente de agua o en el suelo o subsuelo, aguas

residuales que contengan contaminantes, sin previo tratamiento y el permiso o autorización de la autoridad federal, o de la autoridad local en los casos de descargas en aguas de jurisdicción local o a los sistemas de drenaje y alcantarillado de los centros de población.

En el capítulo IV enfocado a la Prevención y Control de la Contaminación del Suelo, indica el artículo 134, para la prevención y control de la contaminación del suelo, se considera en el apartado V, *en los suelos contaminados por la presencia de materiales o residuos peligrosos, deberán llevarse a cabo las acciones necesarias para recuperar o restablecer sus condiciones, de tal manera que puedan ser utilizados en cualquier tipo de actividad prevista por el programa de desarrollo urbano o de ordenamiento ecológico que resulte aplicable*. El artículo 136 establece que los residuos que se acumulen o puedan acumularse y se depositen o infiltren en los suelos deberán reunir las condiciones necesarias para prevenir o evitar I, la contaminación del suelo; II, las alteraciones nocivas en el proceso biológico de los suelos; III, las alteraciones en el suelo que perjudiquen su aprovechamiento, uso o explotación, y IV, riesgos y problemas de salud.

El artículo 139, indica que toda descarga, depósito o infiltración de sustancias o materiales contaminantes en los suelos se sujetará a lo que disponga esta Ley, la Ley de Aguas Nacionales, sus disposiciones reglamentarias y las normas oficiales mexicanas que para tal efecto expida la Secretaría.

El artículo 148, cuando para garantizar la seguridad de los vecinos de una industria que lleve a cabo actividades altamente riesgosas, sea necesario establecer una zona intermedia de salvaguarda, el Gobierno Federal podrá, mediante declaratoria, establecer restricciones a los usos urbanos que pudieran ocasionar riesgos para la población. La Secretaría promoverá, ante las autoridades locales competentes, que los planes o programas de desarrollo urbano establezcan que en dichas zonas no se permitirán los usos habitacionales, comerciales u otros que pongan en riesgo a la población.

El artículo 151, indica que la responsabilidad del manejo y disposición final de los residuos peligrosos corresponde a quien los genera. En el caso de que se contrate los servicios de manejo y disposición final de los residuos peligrosos con empresas autorizadas por la Secretaría y los residuos sean entregados a dichas empresas la responsabilidad por las operaciones será de éstas, independientemente de la responsabilidad que, en su caso, tenga quien los generó.

Quienes generen, reusen o reciclen residuos peligrosos, deberán hacerlo del conocimiento de la Secretaría en los términos previstos en el Reglamento de la presente Ley. En las autorizaciones para el establecimiento de confinamientos de residuos peligrosos, sólo se incluirán los residuos que no puedan ser técnica y económicamente sujetos de reuso, reciclamiento o destrucción térmica o físico-química, y no se permitirá el confinamiento de residuos peligrosos en estado líquido.

II. Norma Oficial Mexicana respecto a límites permisibles de hidrocarburos

En nuestro país no existen normas con respecto a límites permisibles de hidrocarburos en el ambiente (suelo, agua y aire), por lo que se ha recurrido a referencias de organismos internacionales (Canadá, Países Bajos y Estados Unidos). En los Estados Unidos, cada gobierno estatal ha desarrollado sus propios límites permisibles, los cuales fueron definidos de acuerdo a una evaluación de riesgo. Para un mismo parámetro existe una gran discrepancia por ejemplo para HTP (Hidrocarburos Totales del Petróleo), el límite varía de 40 a 2000 mgKg⁻¹. En México, la PROFEPA ha manejado criterios de limpieza desarrollados por el Grupo de Trabajo sobre Restauración de Suelos Contaminados conformado por esta dependencia (Diario Oficial Federación, 1999).

La NOM-075-ECOL-1995, publicada el 26 de octubre de 1995 por el Diario Oficial de la Federación, establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de compuestos orgánicos volátiles provenientes del proceso de los separadores agua-aceite de las refinerías de petróleo, el grado de concordancia con normas y recomendaciones internacionales. Indica que los elementos y preceptos de orden técnico y jurídico en esta norma oficial mexicana se basan en los fundamentos técnicos y científicos reconocidos

internacionalmente y coincide parcialmente con la Norma Federal de los Estados Unidos de América USEPA-1990.

La Norma Oficial Mexicana NOM-055-ECOL-1996 del 13 de Diciembre de 1996, decretado por el Diario Oficial establece los siguientes aspectos para atender la contaminación del suelo, destacando:

- Art. 134. Menciona los criterios de la prevención y control de la contaminación; párrafo I. Corresponde al estado y la sociedad prevenir la contaminación del suelo. II. Deben controlarse los residuos en tanto que constituyen la principal fuente de contaminación del suelo; IV. Se establece que en los suelos contaminados por la presencia de materiales o residuos peligrosos, deberán llevarse a cabo acciones necesarias para recuperar o restablecer sus condiciones, de tal manera que puedan ser utilizados en cualquier tipo de actividad prevista por el programa de ordenamiento ecológico que resulte aplicable.
- Art. 136 Los residuos que se acumulen o puedan acumularse y se depositen o infiltren en los suelos deberán reunir las condiciones necesarias para prevenir o evitar: I. Contaminación del suelo, II. Las alteraciones nocivas en el proceso biológico de los suelos; III. Las alteraciones en el suelo que perjudiquen su aprovechamiento, uso o explotación y; IV. Riesgos y problemas de salud
- Art. 139 Toda descarga, depósito o infiltración de sustancias o materiales contaminantes en los suelos se sujetará a lo que disponga esta ley, la ley de Aguas Nacionales, sus disposiciones reglamentarias y las Normas Oficiales Mexicanas que para tal efecto expida la Secretaría.
- Art. 140 La generación, manejo y disposición final de los residuos de lenta degradación deberá sujetarse a la que establezca en las Normas Oficiales Mexicanas que al respecto expida la Secretaría, en coordinación con la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial.

En México se han emitido normas oficiales para manejo de residuos en general, se caracterizan como residuos peligrosos, determinación de componentes de los residuos, incompatibilidad de dos o más residuos, su confinamiento, diseño, construcción y mantenimiento de obras para su confinamiento y obras complementarias.

Cuadro 2. Normas Oficiales Mexicanas para manejo de residuos

NORMA OFICIAL MEXICANA	CONTENIDO
NOM-055-ECOL-1996	Que establece los requisitos que deben reunir los sitios que se destinarán para un confinamiento controlado y a la instalación de centros integrales para el manejo de residuos industriales peligrosos.
NOM-052-ECOL-93,	Que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.
NOM-054-ECOL-1993	Que establece el procedimiento para determinar la incompatibilidad entre dos o mas residuos considerados como peligrosos.

Cuadro 2. Continuación

NORMA OFICIAL MEXICANA	CONTENIDO
NOM-055-ECOL-1993	Que establece los requisitos que deben reunir los sitios destinados al confinamiento controlado de residuos peligrosos, excepto de los radiactivos.
NOM-056-ECOL-1993	Que establece los requisitos para el diseño y construcción de las obras complementarias de un confinamiento controlado de residuos peligrosos.
NOM-057-ECOL-1993	Que establece los requisitos que deben observarse en el diseño, construcción y operación de celdas de un confinamiento controlado para residuos peligrosos.
NOM-058-ECOL-1993	Que establece los requisitos para la operación de un confinamiento controlado de residuos peligrosos.
NOM-053-ECOL-1993	Que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.

Fuente: Elaboración directa

Las normas oficiales referente a hidrocarburos van desde especificaciones que deben observarse en las actividades de perforación de pozos petroleros; así como de la instalación, mantenimiento, transporte y distribución de hidrocarburos vía terrestre, la regulación de emisión de gases permisible de hidrocarburos; de gases contaminantes provenientes del escape de los vehículos establece los requisitos; especificaciones y parámetros para la instalación de sistemas de Recuperación de Vapores de Hidrocarburos (Hc) en estaciones de servicio ubicadas en el Valle de México; límites máximos permisibles de contaminación en suelos afectados por hidrocarburos.

Cuadro 3. Normas Oficiales Mexicanas para manejo de Hidrocarburos

NORMA OFICIAL MEXICANA	CONTENIDO
NOM-041-ECOL-1999	Que establece los límites máximos permisibles de emisión de gases contaminantes provenientes del escape de los vehículos provenientes del escape de los vehículos automotores en circulación que usan gasolina como combustible.
PROYECTO DE NORMA OFICIAL MEXICANA PROY-NOM-042-ECOL-1999	Que establece los límites máximos permisibles de emisión de hidrocarburos no quemados, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y partículas suspendidas provenientes del escape de vehículos automotores nuevos en planta, así como de hidrocarburos evaporativos provenientes del sistema de combustible que usan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural y diesel de los mismos, con peso bruto vehicular que no exceda los 3, 856 kilogramos
NOM-PA-CCAT 022/93 (NE),	Que regula la contaminación atmosférica en fuentes fijas y establece los requisitos, especificaciones y parámetros para la instalación de sistemas de recuperación de vapores de hidrocarburos (Hc) en estaciones de servicio ubicadas en el valle de México.
NOM-044-ECOL-1993	Que establece los niveles máximos permisibles de emisión de hidrocarburos, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, partículas suspendidas totales y opacidad de humo provenientes del escape de motores nuevos que usan diesel como combustible y que se utilizaran para la propulsión de vehículos

NOM-CCA-031-ECOL/1993	automotores con peso bruto vehicular mayor de 3,857 kilogramos Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales provenientes de la industria, actividades agroindustriales, de servicios y el tratamiento de aguas residuales a los sistemas de drenaje y alcantarillado urbano o municipal
NOM-062-ECOL-1994	Que establece las especificaciones para mitigar los efectos adversos sobre la biodiversidad que se ocasionen por el cambio de uso del suelo de terrenos forestales a agropecuarios.
NOM-075-ECOL-1995	Que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de compuestos orgánicos volátiles provenientes del proceso de los separadores agua-aceite de las refinerías de petróleo.
NOM-076-ECOL-1995	Que establece los niveles máximos permisibles de emisión de hidrocarburos no quemados, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno provenientes del escape, así como de hidrocarburos evaporativos provenientes del sistema de combustible, que usan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural y otros combustibles alternos y que se utilizaran para la propulsión de vehículos automotores, con peso bruto vehicular, mayor de 3,857 kilogramos nuevos en planta.
NOM-115-ECOL-1998	Que establece las especificaciones de protección ambiental que deben observarse en las actividades de perforación de pozos petroleros terrestres para exploración y producción en zonas agrícolas, ganaderas y eriales.
NOM-EM-128-ECOL-1998	Que establece los límites máximos permisibles de emisión de hidrocarburos no quemados, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y partículas suspendidas, provenientes del escape de automóviles y camiones nuevos en planta, así como de hidrocarburos evaporativos provenientes del sistema de combustible que usan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural y diesel de los mismos, con peso bruto vehicular que no exceda los 3,856 kilogramos.
NOM-EM-132-ECOL-1998	Que establece las características del equipo y procedimiento de medición para la verificación de los límites de emisión de contaminantes provenientes de los vehículos automotores en circulación que usan gasolina gas licuado de petróleo, gas natural u otros combustibles alternos.
NOM-PA-CCAT 022/93 (NE),	Que regula la contaminación atmosférica en fuentes fijas y establece los requisitos, especificaciones y parámetros para la instalación de sistemas de recuperación de vapores de hidrocarburos (Hc) en estaciones de servicio ubicadas en el valle de México.

Fuente: Elaboración directa

2.1.7. Contaminación de hidrocarburos en el suelo

Las propiedades físicas del suelo se ven muy afectadas por la contaminación con hidrocarburos, al aglutinarse las partículas del suelo se generan estructuras más gruesas que cubren la superficie de las partículas y el espacio poroso y afectan la aireación del suelo. La película que cubre las partículas es hidrófoba y disminuye la retención de agua. Por otro lado, el contenido de materia orgánica del suelo se incrementa notablemente, así como la acidificación y la saturación de bases y la capacidad de intercambio catiónico. Estos factores acarrearán una disminución de la fertilidad del suelo.

Es fácil imaginar el impacto que la contaminación de hidrocarburos del petróleo puede presentar en el equilibrio ecológico de la rizosfera, cuando las concentraciones son tóxicas, los hidrocarburos del petróleo inhiben la masofauna del suelo; en casos de toxicidad aguda, se inhibe la germinación y el rebrote de meristemos y la elongación radicular disminuye, así como el contenido de clorofila y la fotosíntesis. No obstante, se ha observado que a bajas concentraciones, los hidrocarburos estimulan el crecimiento de los vegetales (Pérez *et al.*, 2002).

El destino de los hidrocarburos en el suelo fue descrito por McGill *et al.* (1981), quienes explican que los hidrocarburos inicialmente pasan por dos procesos: 1) la volatilización y 2) la fotooxidación. Posteriormente, atraviesan por un proceso de descomposición biológica, donde los microorganismos, los nutrientes, el oxígeno, la textura y el pH van a ser fundamentales. Como resultado de este último proceso, se van a obtener productos intermedios, células microbianas y CO₂ que se van a la atmósfera (Figura 2). Por último los productos derivados de la descomposición biológica siguen dos caminos: 1) se incorporan al humus del suelo y 2) se lixivian.

McGill *et al.* (1981), describieron de la siguiente manera los componentes del petróleo que se encuentran adheridos al suelo:

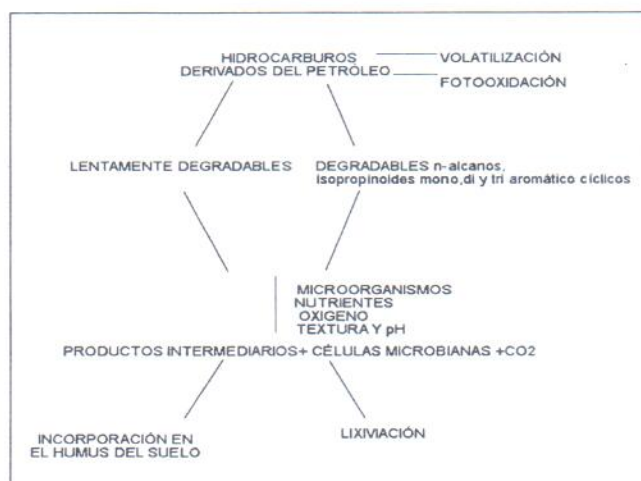


Figura 2. Destino de los hidrocarburos en el suelo McGill *et al.*, 1981

2.1.8. Efectos en las plantas por la contaminación de hidrocarburos en el suelo

El petróleo afecta el crecimiento de las plantas de diferentes formas, puede matar directamente a la planta o retardar su crecimiento; así mismo inhibir la germinación de las semillas, crear condiciones de deficiencias nutrimentales debido a la inmovilización de nutrimentos durante la descomposición de hidrocarburos; aunque en bajas concentraciones (<0.1%) estimular el crecimiento vegetal (López, 1991).

González (1995), menciona que el petróleo causa efectos en plantas, como defoliación, disminución de la cobertura vegetativa y la duración del periodo de la mortalidad de una comunidad vegetativa, de manera conjunta y directa, repercuten en la velocidad de recolonización de los terrenos contaminados.

Las plantas más susceptibles al petróleo son cultivos anuales, plantas de vivero, variedades con enraizamiento somero, plantas de mucha superficie foliar o cutícula delgada y plantas sin sistema radicular (líquenes y musgos).

Las plantas con reservas (cultivos de raíz), especies caducifolias, plantas provistas con cutícula gruesa y cerosa y de baja densidad estomática como las xerófitas son más resistentes a daños por petróleo (López, 1991). El petróleo puede afectar más a las partes fotosintéticas de la planta que a las raíces o la corteza.

Anderson *et al.* (1994) mencionan que las plantas que crecen sobre suelos contaminados por hidrocarburos pueden presentar síntomas similares al efecto de sequía, debido a que alrededor de la raíz se forma una película grasosa que impide la entrada de agua. El estrés hídrico afecta a diversas estructuras anatómicas y morfológicas; y procesos fisiológicos y bioquímicos, en alguna etapa de crecimiento de las plantas (Kramer, 1974; citado por Islas, 2001). Las gramíneas se adaptan mejor a estas condiciones y pueden crecer sin muchos problemas (Anderson *et al.*, 1994).

2.1.9. Recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos

Los suelos contaminados por hidrocarburos se consideran materiales peligrosos, por lo que antes se solicitaba un análisis CRETIB (Corrosividad, Reactividad, Explosividad, Toxicidad, Inflamabilidad y Biológico –Infeccioso), sin embargo, el Instituto Nacional de Ecología (INE) ha establecido nuevos criterios basados en análisis químicos. En la actualidad se procede a identificar el tipo y concentración de los contaminantes, lo cual constituye el punto de partida para estudiar las alternativas que permitan su tratamiento. Lo anterior está fundamentado en que la información que aportan los análisis CRETIB en relación con los compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles, no es representativo en el caso de hidrocarburos intemperizados, porque éstos seguramente se volatilizaron durante la toma de muestra, lo que sí se sigue aplicando para muestras de suelo y agua contaminada, es la cuantificación de metales pesados de acuerdo con la normatividad.

2.1.10. Impacto ambiental de los hidrocarburos

El impacto ambiental ocasionado por la industria petrolera comprende los efectos de todas y cada una de las fases involucradas en las etapas que son: exploración, explotación, transformación, distribución y comercialización. Las actividades en cada una de ellas han efectuado los recursos naturales, representados básicamente por agua, aire, suelo y biota (SEDUE-INE, 1994).

Durante la exploración terrestre, se habla de desmontes para la construcción de rutas de acceso y eliminación de la cubierta vegetal y edáfica para la instalación de campamentos, que trae como consecuencia el desplazamiento de especies animales. Se presentan problemas de contaminación por derrames y explosiones. En la exploración marina, además de la alteración de los ecosistemas marinos existen mayores posibilidades de dispersión de contaminantes que en el medio terrestre (Saval, 1998).

En la exploración terrestre, la perturbación de los ecosistemas se da por los asentamientos irregulares que se instalan a las orillas de las vías de acceso, deforestación por la construcción de caminos y cambios en la dinámica del flujo de las aguas

superficiales. Se presenta una mayor acumulación de desechos industriales como recortes y lodos de perforación, lodos aceitosos, aditivos químicos y aceites gastados, las posibilidades de derrame de crudo son mayores y se observa también la emisión de contaminantes a la atmósfera. El establecimiento de asentamientos humanos genera aguas negras que también tienen impacto sobre los ecosistemas (Saval, 2004).

La industria de la refinación requiere de grandes espacios para la instalación de tanques de almacenamiento. Su actividad es básicamente la separación de los productos del petróleo, en diferentes fracciones de acuerdo con sus características químicas y usos. Los principales productos que se procesan son: crudo pesado, ligero, superligero y reconstituido, gas seco y licuado, gasolinas, querosenos, diésel, gasóleos, combustóleo, asfaltos, grasas y lubricantes. Las actividades de proceso requieren líneas de distribución para fluidos, vapores y gases, se tiene un importante consumo de agua de enfriamiento y el vertimiento de aguas residuales conteniendo compuestos tóxicos. Aumentan las posibilidades de fugas, derrames y explosiones (Saval, 2004).

La actividad de la industria petroquímica requiere instalaciones de proceso más sofisticadas que la refinación, dado que es básicamente una industria de transformación. Produce una variedad de sustancias complejas entre las que destacan: anhídrido carbónico, amoníaco, metanol, etileno, dicloroetano, polietileno, acetaldehído, cloruro de vinilo, xilenos, tolueno, benceno, etilbenceno, estireno, acrilonitrilo, propileno, dodecibenceno y pentano. Dentro de las instalaciones se tienen también riesgos de fugas, derrames y explosiones, así como descarga de aguas residuales contaminadas, tal como ocurre en la refinación, pero en petroquímica los compuestos que se manejan son aún más tóxicos. Por lo general, los residuos de la petroquímica están considerados peligrosos y en una importante mayoría no son susceptibles de ser sometidos a tratamiento (Saval, 1995b).

La distribución de productos a través de ductos y pipas, así como su almacenamiento en grandes tanques, presenta un alto riesgo por las posibilidades de fugas y derrames que

afectan principalmente el suelo y los cuerpos de agua aledaños al sitio de trabajo (Saval, 1995b). La evaluación del daño es un diagnóstico que debe ser 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 medidas de mitigación, limpieza y en su caso, restauración. Es una actividad en la que necesariamente confluyen diversas disciplinas, las cuales deben interactuar para arrojar resultados completos.

Todos los hidrocarburos del petróleo son insolubles en agua y por ser menos densos que ésta tienden a flotar, esta característica es importante porque marca la estrategia del diagnóstico en un sitio contaminado. Los combustibles no siempre se ven, pero tienen la ventaja de que huelen y de que su olor es fácilmente reconocido. Los derrames de petróleo crudo y de residuos de perforación tienen la característica de ser completamente visible por su color y su aspecto. Tal vez éstos son los que más daño han ocasionado a los ecosistemas, y el daño puede empezar a ser estimado por las claras evidencias (Saval, 2004).

Específicamente en Tabasco, se han reportado daños a los ecosistemas, que incluso han afectado otras actividades económicas de la región. Los daños han afectado zonas de cultivo, de caza y de pesca, se dice incluso que se han violado zonas decretadas como reserva ecológica y de amortiguamiento, donde se concentra la mayor parte de las especies de flora y fauna protegidas, por lo que es necesario redefinir dichas áreas. Desafortunadamente, la situación no ha podido ser controlada, y en la actualidad se manejan tantos intereses políticos que dejan poco espacio para la toma de decisiones bien fundamentadas (Zavala *et al.*, 2003).

La evaluación del daño constituye un estudio completo de caracterización que incluye; un análisis del sitio y sus alrededores, un análisis geohidrológico, un análisis químico de los contaminantes y un análisis fisicoquímico de suelo o agua contaminados. Se puede hablar de varios niveles de reparación del daño, que son: mitigación, remediación y restauración (Saval, 1995a).

2.1.11. Procesos de limpieza de suelos contaminados

Existen diferentes procesos biotecnológicos para limpiar los suelos contaminados. El principio básico es destruir o modificar los materiales contaminantes con el fin de que sean menos dañinos o dejen de serlo por completo. Según el lugar en donde se realiza se denominan *in situ*, *on site* y *ex situ*, y según al tipo de tratamiento son de naturaleza fisicoquímica o biológica. Todos los procesos de remediación biológica aprovechan la capacidad degradativa de los microorganismos del suelo y en algunos casos también la capacidad depuradora de las plantas (Pérez -Vega *et al.*, 2002).

2.1.12. Principales tecnologías para la eliminación de contaminantes

En la década de los 80 y de los 90 se trabajó intensamente en el desarrollo de tecnologías para eliminar los tóxicos ambientales. Inicialmente, la limpieza de un sitio consistía en el traslado del material contaminado a otro lugar donde era confinado o se incineraba. Estas alternativas normalmente encontraron gran oposición en las comunidades cercanas a las instalaciones de recepción y cremación (Botello, 1996).

La Grega (1999) y Bazzaz (1998) indican que el desarrollo tecnológico en destoxificación ambiental se ha orientado hacia el diseño de procesos físicos, químicos, biológicos o combinaciones de ellos que tengan las siguientes características:

1. Que transformen los tóxicos ambientales en sustancias menos peligrosas para el hombre ya sea porque los destruya completamente, disminuya su toxicidad, disminuya su concentración en los medios que entran en contacto con las poblaciones humanas, los modifique químicamente y el cambio introducido disminuya la probabilidad de que se produzcan exposiciones efectivas.
2. Los riesgos para la salud durante el proceso de limpieza deben de ser tolerables, los riesgos remanentes, después de terminada la restauración, deben ser iguales o menores que los establecidos en las metas de restauración.
3. La transformación se lleve a cabo en el sitio mismo donde se encuentran los tóxicos, de ser posible sin tener que desplazar, dentro del sitio, el medio contaminado (técnicas *in situ*).

4. Por último que logren la disminución o eliminación del peligro para la salud en tiempos y costos razonables.

Actualmente, se cuenta con información de más de 100 tecnologías diferentes que se basan en los siguientes procesos.

2.1.13. Tecnologías para la recuperación de sitios contaminados

Las tecnologías de recuperación de sitios contaminados pueden dividirse en diferentes categorías. Entre ellas se pueden distinguir tres: "*in-situ*" (sin excavar el terreno), "*on-site*" (se excava el terreno y se trata el suelo en el mismo emplazamiento), y "*off-site*" (se excava el terreno y se trata el suelo en otro sitio) (Torres, 2003).

Estas técnicas pueden ir encaminadas a impedir la dispersión de los contaminantes o bien a recuperar el sitio. Iturbide *et al.* (1997) propone una clasificación de tecnologías puede ser la siguiente:

Tecnologías térmicas. Las tecnologías térmicas son desarrolladas para eliminar o detoxificar residuos especiales mediante altas temperaturas. Los métodos térmicos más conocidos son: incineración en horno rotatorio, desorción térmica y tratamiento térmico infrarrojo.

Tecnologías físico-químicas. Los métodos más conocidos son: extracción física o química, solidificación/estabilización, vitrificación y electromigración.

Tecnologías biológicas: Biorestauración (*in situ* y *off site*), degradación estimulada *in situ*, biodegradación. métodos: landfarming, compostaje en pilas, compostaje en reactor, compostaje en pilas con sistema automático de aireación y biodegradación *in situ*.

Tecnologías de control de dispersión de la contaminación. Los métodos más comunes son: recubrimiento de la contaminación, desviación y recogida de aguas superficiales, nivelación, técnicas de bombeo, drenajes subsuperficiales, barreras de contención, barreras de arcilla, barrera de suelo-bentonita, barrera de bentonita-cemento, barrera con membrana y barrera de pilotes.

Sin embargo, estos tratamientos se identifican por alto costo, ante la necesidad de recuperar sitios contaminados, se observó que el usar plantas para limpiar el ambiente

no es nuevo, pero en su mayoría la investigación en esta área se está usando en pocas plantas pioneras o colonizadoras que crecieron en áreas contaminadas.

2.1.14. Tecnologías de restauración ambiental

Las tecnologías de restauración se clasifican en dos grandes grupos (Iturbide *et al*; 1997):

1. Técnicas tradicionales o establecidas y
2. Técnicas innovadoras.

Las primeras son técnicas desarrolladas antes de 1980 y que se han probado que son efectivas y de uso común a escala de campo. Como ejemplo de estas técnicas están la inmovilización por vitrificación y cementación en instalaciones de confinamiento y la incineración de medios contaminados en hornos de cremación de residuos tóxicos.

Las segundas son técnicas propuestas más recientemente y que se pueden encontrar en diferentes etapas de desarrollo (Fernández- Linares; 2002):

1. Etapa de concepto (idea, investigación, pruebas de laboratorio)
2. Tecnología incipiente (prueba a escala reducida)
3. Tecnología utilizable (estudio piloto, estudio de demostración, uso limitado a gran escala).

Los principales métodos están clasificados como: métodos biológicos, métodos químicos, extracción, enjuague del suelo *in situ*, técnicas de control, manejo de medios contaminados.

2.1.15. Descripción de tecnologías *ex situ* e *in situ* para control, recuperación o restauración de sitios contaminados

A) Deshalogenación

Es un proceso por medio del cual, se reduce el número de átomos de halógeno que se encuentra en una molécula orgánica. Los compuestos polihalogenados son tóxicos y, la disminución del número de halógenos en la molécula disminuye su toxicidad. En la industria y en la agricultura se han usado un número considerable de compuestos

polihalogenados y no siempre se han manejado adecuadamente. Por ejemplo, a) los bifenilos policlorados se usaron en los transformadores de alta tensión, porque son buenos conductores térmicos y al mismo tiempo, son aislantes eléctricos y no son inflamables, b) diclo-Difenil-Tricolorometano (DDT) se usó como insecticida en la agricultura y en el control de insectos vectores de enfermedades c) triclorileno (TCE), Halorespiración de Cloroestanos (PCE), etc; se han usado como disolventes de grasas en el lavado en seco y en el desengrase de partes mecánicas y eléctricas, d) finalmente se usan compuestos clorados en el saneamiento de agua, etc.

Para utilizar la deshalogenación química es necesario extraer el suelo contaminado y eliminarle las partículas mayores (piedras, palos, etc.). Esto hace necesario que en el sitio se disponga de un área adecuada para hacer esta tarea (Peña *et al.*, 2001).

B) Polietilenglicol-potasa

En este proceso, la tierra contaminada con bifenilos policlorados se mezcla con el reactivo (Poli etilén glicol alcalino) APEG y se calienta a 150° C durante 4 horas, en una retorta. El compuesto policlorado reacciona con el APEG substituyendo los átomos de cloro por residuos de poli etilén glicol. Los átomos de cloro aparecen como ion cloruro. Los gases y vapores que se producen en el reactor se pasan a un condensador y los no condensables se pasan a un filtro de carbón activado antes de emitirlos a la atmósfera. El agua condensada se usa en el paso de lavado de la tierra tratada. La mezcla de tierra tratada y APEG se envían a un separador donde se recupera el APEG que no reaccionó y se recicla a la retorta (Peña, *et al.*, 2001).

La tierra tratada se lava usando los condensados de la retorta, las aguas de lavado se tratan y se descartan. La tierra tratada se regresa a su lugar de origen después de comprobar que la concentración de los tóxicos llegó al nivel deseado. No se puede usar para tratar grandes cantidades de desechos, ni desechos con concentraciones de los contaminantes mayores al 5% (Schroeder, *et al.*; 1999).

C) Deshalogenación catalítica

La tierra contaminada se mezcla con bicarbonato de sodio, en una relación de 5/1 y se calienta a 400°C. Los compuestos orgánicos se volatilizan, la tierra que sale del reactor se considera limpia y se envía de nuevo al sitio de donde se extrajo. No se tiene que recuperar ningún reactivo de la tierra tratada. Los vapores que se producen pasan a un reactor, donde tiene lugar la deshalogenación catalítica del tóxico. El catalizador es hidróxido de sodio (Ingeniería Civil y Medio Ambiente, 2001).

El equipo que se usa es transportable, se puede llevar al sitio contaminado, lo que evita la transportación de desechos peligrosos. El equipo es más fácil de armar que los incineradores. La deshalogenación catalítica se puede usar para eliminar bifenilos policlorados, plaguicidas, algunos herbicidas y dioxinas (Peña *et al*; 2001).

D) Extracción

Son procedimientos que se pueden hacer *in situ* o *ex situ*, normalmente no degradan el tóxico, sino que lo transfieren del medio contaminado a otro, donde puede ser destruido, utilizando cualquiera de los métodos químicos o biológicos que se describieron anteriormente, o bien pueden incinerarse o confinarse (Ingeniería Civil y Medio Ambiente, 2001).

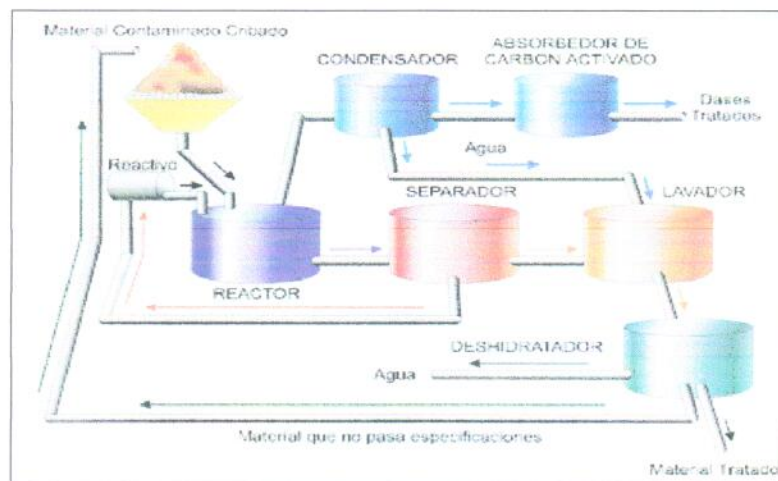


Figura 3. Deshalogenación, remediación *ex situ* (Peña *et al.*, 2001)

Normalmente la transferencia de un medio a otro va acompañada de una reducción considerable del volumen de material a tratar o confinar.

E) Enjuague del suelo *in situ*

El procedimiento consiste en disolver los tóxicos absorbidos en las partículas de suelo utilizando soluciones de lavado. Para lograr lo anterior se perforan pozos de inyección y extracción, cuya localización y profundidad depende de las condiciones del sitio. Por los pozos de inyección se introduce agua a la que se le puede agregar ácidos (clorhídrico o nítrico), bases (hidróxido de sodio o amoníaco), detergentes, disolventes orgánicos (alcohol etílico) o mezclas de ellos. Por los pozos de extracción se colectan las aguas de lavado, las cuales se tratan para eliminarles los tóxicos extraídos y volverlas a utilizar en la preparación de soluciones de lavado (Aburto *et al*; 2000).

Las soluciones ácidas y alcalinas se usan para extraer compuestos inorgánicos y orgánicos polares que no se pueden extraer con agua. Los detergentes y los disolventes orgánicos se usan para ayudar en la eliminación de sustancias no polares (Peña *et al*., 2001).

F) Técnicas de control

El propósito de las técnicas de control es confinar la contaminación existente en los medios que ya están contaminados evitando que ésta se distribuya a otras regiones. Las medidas de control pasivas consisten en evitar que se presenten lixiviados, que se propaguen las plumas de contaminación en los acuíferos y en desviar corrientes superficiales. Estas medidas se pueden utilizar en conjunto con métodos para eliminar la contaminación tales como bombeo y tratamiento (Peña *et al*; 2001).

Se pueden construir barreras impermeables, paredes con tortas filtrantes, paredes de mortero o paredes metálicas. Las paredes impermeables lógicamente impiden el flujo de agua haciendo que se incremente el nivel freático aguas arriba. El incremento en la presión hidrostática puede causar desviaciones en la dirección del flujo y con ello la

distribución no controlada del tóxico hacia otras partes (Ingeniería Civil y Medio Ambiente, 2001).

Para formar las paredes con tortas filtrantes se excava una zanja abajo de una lechada de bentonita en agua y se rellena de una mezcla de suelo y bentonita. El propósito de excavar bajo la lechada es estabilizar las paredes de la zanja durante la excavación e introducir la bentonita en el suelo formando la torta filtrante. La barrera se construye de tal manera que llegue a una capa impermeable del subsuelo. Las paredes con tortas filtrantes se usan para restringir la movilidad de acuíferos contaminados, desviar las aguas contaminadas (para evitar que éstas lleguen a fuentes de agua potable), desviar el flujo de aguas no contaminadas para evitar que se contaminen y delimitar zonas contaminadas que se vayan a tratar (Schroeder, *et al*; 1999).

Las cortinas de mortero son barreras subterráneas que se forman inyectando mortero bien sea a base de cemento o a base de plásticos, bentonita o silicato de sodio. Se usan para sellar poros en suelos permeables. Las paredes metálicas se construyen enterrando hojas de metal (láminas de acero) en el suelo y sellando las juntas con finos. También se pueden usar hojas de madera y placas de concreto (Peña *et al*; 2001).

2.2. Remediación

2.2.1. Concepto de remediación

El término “remediación”, aunque no está definido en México en algún documento oficial, actualmente es utilizado para referirse a todas aquellas acciones aplicadas a suelos y acuíferos que conduzcan a la reducción de niveles de contaminación (Saval, 1998).

Las opciones tecnológicas de remediación que se ha comprobado para su efectividad en sitios contaminados con hidrocarburos se pueden citar: biorremediación, extracción, fijación, incineración y filtración. Se recomienda la realización de estudios de

tratabilidad a nivel de laboratorio, con el fin de obtener información relacionada con su efectividad (Saval, 2004)

2.2.2. Remediación en México

La necesidad de sanear suelos contaminados ha promovido la creciente aparición de empresas, tanto nacionales como extranjeras interesadas en colocar sus productos o servicios de remediación en México, muchas de ellas sin conocimientos o experiencias previas. Lo anterior ha dejado una mala imagen no solamente de las técnicas que aplican, por lo que las empresas que actúan con responsabilidad han tenido que luchar contra esa mala imagen (Saval, 2004).

Las experiencias exitosas de remediación que hasta ahora se han registrado en las instancias gubernamentales encargadas, están referidas a situaciones en las que se alcanzaron los límites de limpieza establecidos para cada caso particular. Debido al desconocimiento de los aspectos técnicos involucrados en cada caso y a la necesidad de proteger el conocimiento en el uso específico de cada técnica, no se documenta con claridad la forma en que se llegó a los límites establecidos (Saval, 1998).

Esto ha dado origen a muchas preguntas que, por lo general, no se responden directamente. En lo que se refiere a productos para la remediación de suelos, lo más común es encontrar formulaciones cuya descripción del contenido es mínima.

El ejemplo típico indica Saval. (2004), lo constituyen aquéllos que se venden bajo el nombre de “productos para biorremediación”, como bacterias y agentes tensoactivos. Se ha tenido varias experiencias en México con los productos comerciales de origen microbiano. Algunos de ellos son efectivos, mientras que otros no, ya sea porque no son bacterias degradadoras o porque no son viables.

Lo anterior se ha descubierto mediante pruebas simultáneas en un mismo sitio: por un lado se deja actuar la flora nativa, que se estimula solamente con nutrientes y

oxigenación, y por otro se aplican los productos comerciales bajo las especificaciones del proveedor. Los resultados indican que, por lo general, las bacterias nativas son mejores que las contenidas en los productos comerciales, porque las nativas están adaptadas a los contaminantes propios del lugar. También, conviene señalar que varios productos comerciales, contienen bacterias que han sido manipuladas genéticamente. La aplicación de éstas en el ambiente aún no ha sido aprobada a escala mundial, en virtud del riesgo que implica su manejo y dispersión en sitios abiertos.

Por lo que respecta al uso de agentes tenso activos (surfactantes) e ingredientes activos de jabones y detergentes, son de gran utilidad en remediación, ya que permiten resolver los contaminantes de la fase sólida del suelo, para ponerlos en fase acuosa. Su uso se está intensificando en México, pero es importante tener en cuenta el riesgo que implica su aplicación en suelos y cuerpos de agua sin una dosificación y control, ya que pueden generar problemas ambientales secundarios, como la disolución de los hidrocarburos y agua (Saval, 1997).

Entre otras experiencias negativas ocurridas en México se ha observado que un suelo contaminado se mezcla con suelo limpio, como una forma de “disolución”, para reducir la concentración de contaminantes y, con ellos, facilitar la aplicación de otras técnicas de remediación. Otros ejemplos más graves han sido la aplicación de fuertes oxidantes químicos al suelo para transformar los contaminantes en bióxido de carbono; el simple movimiento del suelo para ventilar y transferir a la atmósfera contaminantes volátiles adsorbidos en el suelo, o incluso la generación de lixiviados que alcanzan el manto freático por la adición de químicos que, se dice, son estabilizadores (Chow, 1998).

Desafortunadamente, estas actividades son llevadas a la práctica bajo el nombre de tecnologías de remediación y aunque en algunos casos se logra la reducción en la concentración de contaminantes, es un hecho que las condiciones del sitio se deterioran de manera importante (Fernández-Linares, 2002).

Dada la diversidad de técnicas para remediación y algunas malas prácticas que se han detectado, durante 1997 las autoridades ambientales establecieron programas para la revisión curricular de las empresas provenientes de servicios de remediación, con el apoyo de órganos colegiados. Sin embargo, este trabajo consumió mucho tiempo y no se obtuvieron los beneficios esperados. En 1998, la tendencia fue poner en marcha trabajos de remediación en campo, previa observación de las autoridades ambientales y con una vigilancia muy cercana desde su inicio, con la finalidad de dar seguimiento preciso a cada proyecto bajo esquemas más estructurados. Se requerirá de tiempo para conocer los resultados (Saval, 1998).

2.2.3. Elementos para la elección de una técnica de remediación

Saval (1998) indica que existen elementos básicos para la elección de una técnica de remediación, los cuales deben ser tomados en consideración. De acuerdo Saval *et al.* (2000), competen no sólo a las técnicas de remediación en sí, sino a las características del sitio, entre ellos:

1. Comprender la función que desempeña el suelo afectado en el sitio específico.
2. Definir perfectamente el problema de contaminación con información reciente.
3. Identificar las características de una técnica de remediación limpia.
4. Conocer las ventajas, desventajas y limitaciones de las técnicas de remediación disponibles.
5. Definir claramente el uso que se le dará al suelo después de su remediación, que de acuerdo a la legislación ambiental, puede ser: agrícola, forestal, recreativo, residencial, de conservación, comercial o industrial.

Los dos primeros puntos están dirigidos a la caracterización del sitio, el cual abarca diversos aspectos. De esta caracterización, que se hace de manera cualitativa y cuantitativa, se puede conocer la magnitud del daño causado por la contaminación, el riesgo que se deriva por efecto de la misma, y las necesidades de remediación. Este trabajo requiere de recursos y tiempo. Desafortunadamente, en México realiza con poco

cuidado y se le asigna poco presupuesto, por lo que se sacrifican análisis químicos que proporcionan información importante para definir la estrategia de remediación a realizar.

En la práctica de remediación, entre mayores esfuerzos sean dedicados a la caracterización del sitio, mayor conocimiento se tendrá del problema de contaminación y por consiguiente, la probabilidad de resolverlo será mayor. Aquí radica uno de los secretos del éxito (Saval, 1998).

Por lo que respecta a las técnicas de remediación, existen varias alternativas, pero antes de describirlas es conveniente establecer los requisitos que deben cumplir para ser consideradas ambientalmente aceptables consideran Korda *et al.* (1997) e Islas (2001):

1. Reducir la concentración de los contaminantes, como respuesta directa de su aplicación.
2. No transferir los contaminantes de una matriz a otra.
3. Ser irreversible, esto es, no permitir que, después de cierto tiempo, los contaminantes vuelvan a reaparecer en el lugar, como si nada se hubiera hecho.
4. No crear mayores disturbios ambientales que los propios de la contaminación, aunque cabe agregar que debe.
5. Ser una tecnología integral que incluya tratamiento de desechos en caso de generarlos.

2.2.4. Clasificación de las técnicas de remediación.

A escala mundial, se han desarrollado un gran número de opciones de remediación para suelos contaminados con hidrocarburos, mismas que se pueden clasificar de diferentes maneras. Una de las clasificaciones más comunes es realizar con base en el principio de su funcionamiento, teniendo así técnicas biológicas, fisicoquímicas y térmicas (Blackburn *et al.*; 1993):

1. Biológicas: biorremediación, fitorremediación.
2. Fisicoquímicas: solidificación, estabilización, extracción de vapores.
3. Desorción por inyección de vapor, incineración.

Otra clasificación se basa en el efecto sobre contaminantes, de tal forma que se tienen técnicas de retención, extracción, separación y destrucción son (Russell, 1992):

1. Retención: confinamiento en celdas, barreras impermeables, fijación.
2. Extracción o separación: filtración por carbón activado, lavado con agentes tenso activos, extracción de producto libre, extracción de vapores.
3. Destrucción. biorremediación, fitorremediación, incineración.

En la práctica, las dos clasificaciones mencionadas son válidas e incluso complementarias, ya que generalmente necesitan combinarse.

Dentro del área de remediación de suelos, se maneja también otro concepto de *atenuación natural*. Ésta se refiere al trabajo que la naturaleza hace por sí misma, sin la intervención del hombre, para degradar los contaminantes a través de los ciclos biogeoquímicos que llevan a cabo los microorganismos nativos del suelo. También se conoce como *biorremediación intrínseca* (Saval, 1998).

2.2.5. Tecnologías de remediación utilizadas en México

En el mercado ambiental del país, actualmente existen una gran cantidad de empresas que ofrecen diferentes tipos de tecnologías para la remediación de sitios contaminados. Sin embargo, no fue hasta 1997, que las autoridades ambientales establecieron un programa de verificación y certificación de estas empresas. Actualmente para realizar un trabajo de remediación es necesario contar con permisos específicos, como la licencia ambiental única (LAU). Esta disposición oficial, ha permitido un mayor control acerca de las tecnologías que se ofrecen para remediar suelos y de las posibilidades reales de éxito que estas permiten (INE, 2003).

De acuerdo con datos proporcionados por la SEMARNAT, todas las tecnologías que ofrecen las empresas que cuentan con permisos para remediar suelos contaminados,

están enfocadas exclusivamente a la remediación de sitios contaminados con compuestos orgánicos. De un total de 57 empresas autorizadas, ninguna ofrece servicios para la restauración de suelos contaminados con metales. Dentro de los contaminantes tratados, principalmente se encuentran los hidrocarburos (Hidrocarburos totales del petróleo (HTPs), lodos aceitosos, lodos de perforación y recortes de perforación (SEMARNAT- PROFEPA, 2002).

De acuerdo con datos proporcionados por 40 empresas autorizadas para remediar suelos contaminados con diferentes tipos de contaminantes, la mayoría (31) utilizan métodos biológicos (biorremediación) para el tratamiento. El lavado de suelos, la oxidación química y la separación física constituyen otra parte importante de las tecnologías más empleadas en México (Figura 4).

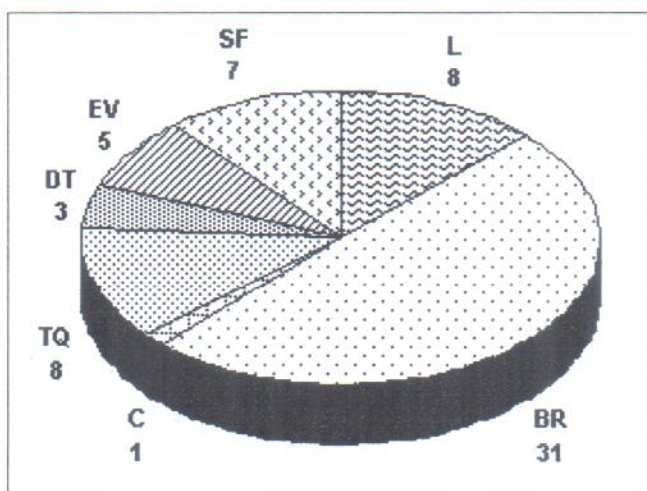


Figura 4. Tecnologías de remediación de suelos utilizadas en México. BR: biorremediación; L: lavado; SF: separación física; EV: extracción de vapores; DT: desorción térmica; TQ: tratamiento químico; C: centrifugación (INE, 2003).

De las empresas que ofrecen servicios de biorremediación, la mayoría utiliza sistemas de composteo y biolabranza. De los tratamientos ofrecidos por estas empresas, el 87.5% de realizan *in situ* y el resto *ex situ*.

Por otra parte, la PROFEPA cuenta con datos acerca de los accidentes (emergencias ambientales) en los que han estado involucradas sustancias peligrosas. A continuación se resumen los principales accidentes ocurridos entre 1993 y 1999 en México, relacionados directamente con la contaminación de suelos, así como las acciones de remediación que se han llevado a cabo en función del tipo de contaminante involucrado (PROFEPA, 2002).

La clasificación de sustancias y compuestos que se regulan en México son:

A. Compuestos orgánicos volátiles

Dentro de las tecnologías de remediación más utilizadas en México para el tratamiento de emisión de compuestos orgánicos volátiles (COVs) no halogenados en suelos, sedimentos y lodos; se encuentran la biorremediación, incineración, emisiones vehiculares (EV) y la desorción térmica (DT) a bajas temperaturas. La incineración generalmente se emplea cuando, además de los combustibles, se encuentran presentes COVs halogenados. En general, estas técnicas pueden emplearse también para tratar sitios contaminados con benceno, tolueno y xilenos (BTX) y combustibles.

Gasolinas: Entre las tecnologías más empleadas en México para la remediación de sitios contaminados con gasolinas se encuentran: (i) la biorremediación (*in situ* y *ex situ*), incluyendo el uso de biopilas y composteo; (ii) las emisiones vehiculares y (iii) la aireación forzada. Estos datos nuevamente confirman que la biorremediación *in situ* ha sido la tecnología más aplicada para este fin. Entre enero de 1997 y noviembre de 1999, se concluyeron un total de 18 trabajos de remediación de sitios contaminados con gasolinas; actualmente 5 se encuentran en proceso y 8 más por iniciar.

Benceno, tolueno y xilenos (BTX): La restauración de sitios afectados a consecuencia de derrames de gasolinas, se basa en el cumplimiento de criterios de limpieza establecidos para HTPs, benceno, tolueno y xilenos, e implica necesariamente su limpieza. En el Cuadro 4, se presenta el número de emergencias ambientales, ocurridas entre 1993 y 1999, durante el transporte de benceno, tolueno y xilenos, afectando directamente suelos (PROFEPA, 2002).

Cuadro 4. Relación del número total de emergencias ambientales

Compuesto	Emergencias	Derrames en tierra	Acción de remediación
Benceno	4	4	Ninguna
Tolueno	15	8 (7 durante el transporte, 1 depósito clandestino)	Ninguna
Xilenos	10	5 (4 durante el transporte, 1 depósito clandestino)	Tres sitios 1997-1999)

Fuente: INE, 2003

De acuerdo con el Cuadro 4, (INE, 2003), del total de las emergencias reportadas, casi la mitad tienen un impacto directo en la contaminación de suelos. Sin embargo, en la mayoría de los casos no se ha realizado ninguna acción de remediación. En el caso de los xilenos, los tres sitios contaminados fueron tratados por biorremediación, dos tecnologías fueron *in situ* y una *ex situ*.

Metanol: Entre 1993 y 1999, se presentaron 15 emergencias ambientales con metanol. De los 15 eventos, 9 ocurrieron durante su transportación terrestre, ocasionando la contaminación de suelos. Sin embargo, entre enero de 1997 y octubre de 1999, no se ha realizado en México ninguna restauración ambiental de los sitios contaminados con metanol. Para la restauración de estos sitios se puede emplear las emisiones vehiculares (EV), la desorción térmica (DT) y la incineración.

B. Compuestos orgánicos semivolátiles

Acrilonitrilo: Aunque se sabe que han ocurrido emergencias ambientales relacionadas con acrilonitrilo, no se tienen datos exactos que indiquen cuantos son los sitios contaminados. De acuerdo con información de la PROFEPA, entre 1997 y 1999, no se ha llevado a cabo ninguna acción de remediación de sitios contaminados con acrilonitrilo.

C. Ácidos y bases

Ácido nítrico: Entre 1993 y 1999 se presentaron 12 emergencias ambientales relacionadas con ácido nítrico. De los 12 eventos, 5 ocurrieron durante la transportación, provocando la contaminación de los sitios en donde se derramó la sustancia. Por ser un

ácido inorgánico fuerte, el ácido nítrico puede tratarse químicamente por reacciones de neutralización, que implican la adición de bases fuertes o débiles al suelo afectado, hasta alcanzar un pH neutro. El área afectada también puede neutralizarse con cal, carbonato de calcio o bicarbonato de sodio (INE, 2003).

Desde 1997 hasta 1999, se reportaron 2 sitios contaminados con ácido nítrico, los cuales están siendo remediados a través de la neutralización *in situ* con hidróxido y carbonato de calcio.

2.2.6. Elementos que definen el éxito de la remediación

Al hablar del éxito de la remediación, pueden existir diversos enfoques, entre ellos:

1. Alcanzar los niveles de limpieza, tomando normatividades extranjeras como referencia.
2. Reducir el riesgo a la salud al disminuir la concentración de compuestos tóxicos.
3. Devolver al sitio una vista agradable en la superficie, sin importar lo que queda enterrado.
4. Reducir los niveles de contaminación, sin importar el efecto sobre el suelo mismo y los alrededores del sitio.
5. Alcanzar los objetivos en el mínimo tiempo posible.
6. Realizar los trabajos al menor costo posible.

De estos enfoques, los más comunes son los dos primeros. El costo y el tiempo de ejecución, a pesar de que no son elementos técnicos, en la mayoría de los casos sirven como base para la toma de decisiones en trabajos de remediación, lo cual aumenta la probabilidad de fracaso (Saval, 1998).

2.3. Biorremediación

2.3.1. Concepto de biorremediación

Es el uso de organismos vivos para contrarrestar los efectos nocivos causados por catástrofes naturales u ocasionadas intencionalmente (Vega, 2000).

Está basada en la degradación de compuestos orgánicos hasta bióxido de carbono, mediante la actividad de microorganismos vivos que los utilizan como fuente de carbono y energía. Funciona únicamente en suelo y cuerpos de agua cuando los hidrocarburos son biodegradables o biotransformables, que están presentes en cuerpos de agua en movimiento. No funciona para compuestos orgánicos recalcitrantes, porque no son biodegradables (Iturbide, *et al*, 1997).

Debido a los datos obtenidos en una evaluación realizada por PEMEX y el IMP en Tabasco Occidental (Ledesma *et al*; 1994), actualmente se considera a la biorremediación como uno de los medios más apropiados para la restauración de sitios contaminados.

2.3.2. Ventaja y desventajas de biorremediación

La biorremediación tiene las desventajas de requerir tiempos largos y de no aplicar en casos donde los materiales geológicos son impermeables o hay presencia de compuestos que afectan la actividad metabólica de los microorganismos, como son los metales pesados y otros agentes tóxicos. La biorremediación es la alternativa más atractiva a escala mundial para el saneamiento de sitios contaminados con hidrocarburos, pero también está limitada a la concentración y el tipo de éstos (Saval, 1998).

Los términos de biorremediación y fitorremediación son ocasionalmente usados como si ellos fueran intercambiables. Ellos actualmente señalan aplicaciones potenciales y conceptos bastante diferentes.

La biorremediación ha surgido recientemente como una alternativa tecnológica para la limpieza de suelos, acuíferos y cuerpos de agua contaminados por hidrocarburos ya que en su mayoría son biodegradables. Los contaminantes de hidrocarburos son transformados en compuestos químicamente más simples, por ejemplo, en bióxido de carbono cuando hay una completa mineralización (Saval, 2004).

El éxito de la biorremediación obedece a la capacidad metabólica de los microorganismos involucrados. La opción más segura es aprovechar la flora autóctona, y su actividad se estimula mediante la adición de nutrientes. A pesar de que la biorremediación toma tiempo, tiene ventaja de que el suelo tratado puede recuperar su actividad biológica natural (Saval, 2004).

2.3.3. Factores que influyen en la biorremediación de sitios contaminados con petróleo.

Scheneider y Billingsley (1990) mencionan que las principales limitaciones de la biorremediación son las fuentes de disponibilidad de nitrógeno y fósforo para aguas y suelos contaminados con hidrocarburos, además se enumeran los requerimientos para la degradación del petróleo:

1. Microorganismos con enzimas oxidantes de los hidrocarburos, habilidad para adherirse a los hidrocarburos y el potencial en la producción de emulsificantes.
2. Agua.
3. Oxígeno
4. Fósforo
5. Fuente de nitrógeno utilizable.

Los factores de especial importancia en la remediación microbiana son humedad, temperatura, pH, toxicidad, tipo de suelo, tipo de contaminantes actuando como se describe enseguida:

Humedad: un requisito y condición para que exista remediación microbiana es mantener un ambiente húmedo, ya que el agua es esencial para que se lleven a cabo todas las actividades metabólicas de los microorganismos.

Temperatura: la temperatura entre 15° y 35°C es la más común, ya que se han encontrado actividades metabólicas en microorganismos de suelos y aguas a esta temperatura. Sin embargo, existen organismos que pueden tener actividad metabólica a 65°C e incluso a más altas. Algunos microorganismos pueden estar activos a 4°C. Por otro lado, Girard (1988) menciona que la temperatura, tiene profunda influencia en las

actividades y procesos bioquímicos que intervienen en la biodegradación de hidrocarburos y que los microorganismos pueden metabolizar a los hidrocarburos en un amplio intervalo de temperaturas.

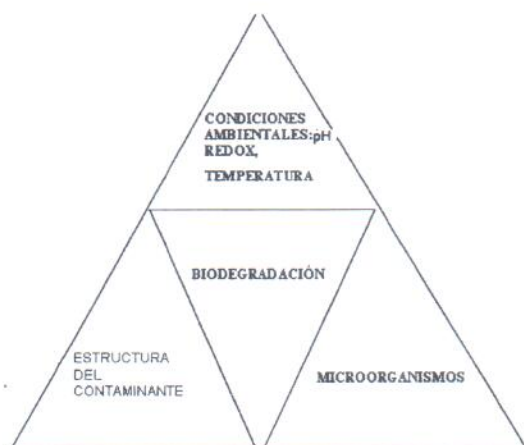


Figura 5. Triangulo de la biodegradación (Suthersan, 1997)

Los efectos de la temperatura son interactivos con otros factores físicos, así como la composición de la comunidad microbiana. Sin embargo, la temperatura no es a menudo el principal factor limitante excepto en la medida en que se relaciona con los factores mencionados (Torres, 2003).

pH: De acuerdo con Schroeder *et al.* (1999), el problema del pH es menos reconocido. Muchos sitios industriales contienen los remanentes de desechos los cuales son muy ácidos o muy alcalinos. Relativamente pocos microorganismos presentan mucha actividad a un pH debajo de 4.0 y arriba de 9.0. En general, las bacterias prefieren ambientes neutros a alcalinos, mientras que los hongos son más tolerantes a ambientes ácidos. Algunos hongos crecen bien a un pH de 2.0. La mayoría de los microorganismos usados en la biorremediación tanto endógenos como exógenos crecen de manera óptima a un pH de 6-8, con un valor preferencial de 7.

Toxicidad: la toxicidad es un factor crítico en la evaluación de la biorremediación. En muchos casos, el contaminante puede tener alta toxicidad hacia los microorganismos o estar presente a concentraciones que son tóxicas. Por ejemplo, las concentraciones de diesel o gasolina en fase de separación son tóxicas para la mayoría de los microorganismos en las muestras de suelo. Es posible encontrar especies seleccionadas de microorganismos, que pueden permanecer en niveles normalmente tóxicos de contaminantes, y además degradan los contaminantes a niveles tolerantes (Shroeder *et al*; 1999).

Tipo de suelo: en esta área no se conoce mucho. Existen evidencias de que altos niveles de materiales húmicos o arcillas inhiben la biodegradación de un compuesto dado, aunque algunos estudios en biorremediación que han sido llevados a cabo con éxito, sugieren que el tipo de suelo no afecta en gran medida a la biodegradación, como otras necesidades de nutrimentos y humedad (Soto *et al*; 1997).

Tipo de contaminantes: no todos los contaminantes orgánicos son biodegradables bajo las condiciones apropiadas. Los compuestos orgánicos pueden estar clasificados de acuerdo con su relativa facilidad de biodegradación. Por ejemplo, como una norma, los compuestos aromáticos son más resistentes a la biodegradación que los compuestos alifáticos. Cualquier halogenación de un compuesto orgánico hace que sea más resistente a la degradación por medio de microorganismos y un alto grado de halogenación lo hace aún más resistente. Generalmente los contaminantes menos solubles son los más resistentes. La introducción de cualquier grado de oxidación a un compuesto la hace más biodegradable. Un compuesto recalcitrante o refractario es un químico que tiene una resistencia inherente a cualquier grado de biodegradación. Ejemplos de estos son los bifenilos policlorados y los aromáticos polinucleares (Schroeder *et al*; 1999).

Girard (1988), menciona al oxígeno como uno de los factores que influyen en la degradación del petróleo. Los hidrocarburos son sustratos orgánicos completamente

reducidos que son fundamentalmente metabolizados de una manera oxidativa. Para fines prácticos, la biodegradación completa de hidrocarburos requiere la presencia de oxígeno en forma molecular. La importancia del oxígeno es evidente por el hecho de que las principales rutas metabólicas utilizadas por los microorganismos para la degradación de aromáticos y saturados, requieren de la participación de las enzimas conocidas como oxigenasas y por ende de oxígeno molecular (Woodward *et al.*; 1996).

2.3.4. Microorganismos degradadores de petróleo o hidrocarburos

La habilidad para degradar hidrocarburos del petróleo, es una característica que está ampliamente distribuida entre los microorganismos (Girard, 1988).

Los microorganismos hidrocarbonoclasticos (degradadores de hidrocarburos), actúan principalmente en la interfase agua-aceite. Al microscopio, los organismos pueden observarse alrededor de la superficie de los glóbulos de aceite, lo que parece indicar que en ausencia de agua, el crecimiento bacteriano no ocurre dentro del glóbulo. El incremento de área superficial de contacto como consecuencia de la extensión del petróleo en el agua favorece y acelera la biodegradación. Este fenómeno junto con la emulsificación del aceite con el agua, permite mayor disponibilidad de oxígeno y nutrientes debido al movimiento de los glóbulos de aceite a través de la columna de agua. La emulsificación o pseudosolubilización del aceite favorece la biodegradación al incrementar también el área superficial de contacto entre el aceite y los microorganismos (Girard, 1988).

Los microorganismos utilizados en la biorremediación de suelos contaminados también han sido consorcios aislados precisamente de suelos contaminados. Se han realizado diversos trabajos que involucran la bioaumentación o inoculación del suelo con microorganismos obteniendo éxito en el resultado. Por ejemplo, Márquez-Rocha *et al.* (1999) en un trabajo realizado sobre la remoción de diesel en un suelo contaminado, utilizó microorganismos naturales degradadores de hidrocarburos. Dicho consorcio fue obtenido de una comunidad microbiana compleja aislada de un sitio contaminado con

hidrocarburos, obteniendo al final una degradación de más del 90% del diesel adicionado.

Los hongos poseen una gran cantidad de enzimas que descomponen el material vegetal, incluyendo lignina y celulosa. Por ejemplo: celulasa, lignasa, proteasa ácida hidrolítica, peroxidasa, lipasa, polifenoloxidasas y citocromo P-450 monooxigenasa. Las enzimas fúngicas han mostrado que degradan numerosos contaminantes como hidrocarburos policíclicos aromáticos (HPA's), fenoles, bifenilos policlorados, nitroaromáticos, pesticidas, etcétera. *Cunninghamella elegans*, *Rhizoctonia solana* y *Phanerochaete chrysosporium* metabolizan HPA's vía múltiples enzimas (Walton *et al.*, 1994b).

April *et al.* (2000) mencionan que el uso de hongos filamentosos para remediar suelos contaminados ofrece ventajas sobre otros organismos por diversas razones, de las que se plantean las siguientes: a) movimiento de las hifas a través del suelo, para acceder a los hidrocarburos, b) las hifas de los hongos pueden penetrar hacia los agregados del suelo impregnados con hidrocarburos, c) muchos hongos poseen enzimas extracelulares con las cuales pueden auxiliar en el inicio del metabolismo microbiano.

El hongo de la pudrición blanca se ha utilizado con mucho interés como inóculo en el suelo. En la naturaleza, este hongo es capaz de descomponer madera. Su habilidad para degradar lignina, uno de los polímeros orgánicos más persistentes en la naturaleza ha conducido a investigar su habilidad para degradar otros contaminantes recalcitrantes. Efectivamente este microorganismo ha sido capaz de degradar una amplia variedad de contaminantes recalcitrantes en laboratorio. Aunque algunos logros se han alcanzado con inoculaciones en campo se ha presentado el problema de predación y competencia con los microorganismos nativos (Bollag *et al.*, 1994).

April *et al.* (2000), realizaron un estudio en una mina del norte de Canadá, donde aislaron 64 especies de hongos filamentosos en cinco sitios, con la finalidad de probar su habilidad en la degradación de petróleo crudo, encontraron que los hongos participan

activamente en la degradación de hidrocarburos alifáticos del petróleo. Ellos indican que en la mayoría de los sitios estudiados encontraron géneros como *Aspergillus*, *Gliocladium*, *Catenulatum*, *Penicillium* y *Pseudallescheria*. También encontraron frecuentemente especies de *Trichoderma*. De estos géneros, *Penicillium* fue el más numeroso, con una mayor cantidad de especies. Scheneider y Billingsley (1990) enlistan organismos con capacidad para degradar hidrocarburos: Hidrocarburos de cadena larga: *Acinetobacter cocoaceticus*, *Arthobacter paraffineus*, *Arthrobacter simplex*, *Candida lopolyticum*, *Cphalosporium roseum*, *Corynebacterium glutamicum*, *Falvobacterium* spp, *Mycobacterium parafficum*, *Mycobacterium smegmatis*, *Nocardia petroleophila*, *Pseudomonas aeruginosa*, *P. fluorescens*. Hidrocarburos aromáticos: *Acinetobacter* spp., *Agrobacterium* spp., *Alcaligenes* spp, *Aspergillus* spp., *Azotobacter* spp, *Bacillus* spp., *Bradyrhizobium*, *Candida*, *Moraxella*, *Neurospora*, *Nocardia*, *Phanerochaete chrysosporium*, *Pseudomonas acidovorans*, *Pseudomonas putida*, *Pseudomonas testosterona*, *Rhizobium*, *Rhodotorula*, *Trichosporon*.

2.3.5. Procesos de la biorremediación

Los procesos mediante los cuales funciona la biorremediación se pueden dividir en 3 grupos: degradación enzimática, remediación microbiana y fitorremediación (Ketchum, 2003).

Degradación enzimática: La degradación enzimática consiste en la utilización de enzimas en el sitio contaminado con el fin de degradar las sustancias nocivas. Dichas enzimas son previamente producidas en bacterias transformadas genéticamente con el gen que codifica para cada enzima en particular. Esta aplicación de la biotecnología lleva décadas en el mercado y hoy en día las compañías biotecnológicas ofrecen las enzimas y también los microorganismos genéticamente modificados (Fernández-Linares; 2002).

Remediación microbiana: La remediación microbiana consiste en el uso de los microorganismos directamente en el foco de contaminación. Estos microorganismos

pueden ya existir en ese sitio o pueden ser originarios de otros ecosistemas en cuyo caso deben ser inoculados en el sitio contaminado (inoculación). En el primer caso, muchas veces suelen administrarse más nutrientes (adición de nutrientes) al medio con el fin de acelerar el proceso de biodegradación. Otra posibilidad es la de introducir cepas modificadas por técnicas de ingeniería genética, a las cuales se les introdujo el gen que codifica para una o más enzimas detoxificadoras (Uso de microorganismos modificados genéticamente) (Torres, 2003).

Fitorremediación: La fitorremediación podría ser definida como el conjunto de métodos para degradar, asimilar, metabolizar o detoxificar metales pesados, compuestos orgánicos, radioactivos y petroderivados por medio de la utilización de plantas que tengan la capacidad fisiológica y bioquímica para absorber, retener degradar o transformar dichas sustancias a formas menos tóxicas (Raskin *et al*; 2000).

Otra posible definición: La fitorremediación consiste en utilizar la capacidad de ciertas plantas (terrestres, acuáticas, leñosas, etc.) y los cultivos *in vitro* derivados de ellas con el fin de remover, contener o transformar productos contaminantes del entorno.

2.3.6. Tecnologías de biorremediación

Biolabranza. Es el arado del suelo contaminado, de la misma forma que se trabaja un suelo para cultivo, con el fin de airear y homogeneizar el suelo contaminado para estimular la actividad microbiana.

Composteo. Es un proceso de degradación que se lleva a cabo en una biopila por la acción de microorganismos aerobios (Fernández, 2000).

Bioestimulación. En este proceso implica la aplicación directa de microorganismos; los cuales pueden ser: a) de los sitios de remediación, b) exógenos y c) obtenidos de la ingeniería genética; con la finalidad de aumentar la biodegradación o biotransformación de los contaminantes.

Bioventeo. Es el suministro de aire a un suelo o cuerpo de agua contaminada, para satisfacer los requerimientos de oxígeno de los microorganismos encargados de la biodegradación (Saval, 1995).

Atenuación natural. Es un proceso de remediación que se lleva a cabo por procesos naturales sin la intervención del hombre. Estos procesos naturales incluyen: los mecanismos biológicos; tales como el crecimiento de plantas y degradación microbiana (EPA, 2000).

2.3.7. Estudios y proyectos de biorremediación en México

Se ha utilizado la biorremediación para el tratamiento de agua residual e industrial, para desinfecciones de estanques; así como de estudios de metales pesados atribuidos a industrias textiles, entre otras. Está tomando auge en nuestro país la importancia y caracterización de microorganismos y bacterias degradadoras para venta industrial (ver Cuadro 5).

Cuadro 5. Investigaciones y proyectos de biorremediación en México

Investigación o proyecto	Autor (es)
Desarrollo de una novel estrategia combinada para el biotratamiento de agua residual y la recuperación de suelos erosionados utilizando bacterias promotoras de crecimiento en microalgas (mgpb) y microalgas movilizadas juntas en polímeros.	Bashan Gorodenizik, Yoav
Desinfección y biocontrol de patógenos en estanquería de camarón.	Ochoa Ochoa, José Luis
Estudio taxonómico de la comunidad bacteriana existente en sistemas de cultivo larvario de camarones peneidos mediante métodos moleculares.	Gómez Gil Rodríguez Sala, Bruno
Desarrollo de un sistema químico-biológico integral para la eliminación de compuestos no-biodegradables contenidos en aguas residuales de origen industrial.	Quiroz Alfaro, Marco Antonio
Caracterización, monitoreo y biorremediación de ambientes acuáticos en el Altiplano y Eje Neovolcánico.	Martínez Díaz de Salas, Manida
Evaluación de tratamientos enzimáticos sobre la genotoxicidad de efluentes textiles.	Loera Corral, Octavio
Conservación y uso de microorganismos benéficos nativos de la Sierra de Santa Rosa.	Olalde Portugal, Víctor
Desalinización biológica de suelos salinos.	Pantoja Ayala, Omar Homero
Métodos biológicos de prueba para la eliminación de bifenilos policlorados (BPCs) de suelos contaminados en el Edo. de México.	Rodríguez Vázquez, Refugio

Cuadro 5. Continuación

Investigación o proyecto	Autor (es)
Desarrollo de un método bioluminiscente simple y rápido, aplicable para el monitoreo de contaminación microbiana en agua y para un adecuado control de las cepas microbianas y medios de cultivos utilizados en las técnicas establecidas en las Normas Mexicanas para análisis de bacterias coliformes en aguas.	Cerda Ramírez, Federico
Escalamiento de procesos de biorremediación en biopilas y tambor rotatorio aplicados a la degradación de hidrocarburos.	Barrera Cortés, Josefina
Poblaciones silvestres de macromicetos (Basidiomycetes) de las serranías y la vegetación tropical de la zona centro del estado de Veracruz.	Bandala Muñoz, Víctor Manuel
Selección de cepas nativas de <i>frankia</i> , que favorezcan una reforestación con casuarina en el noreste de México.	Mendoza Herrera, Alberto
Fuente: Elaboración directa	

2.4. Biorrestauración

También se le conoce con el nombre de medidas biocorrectivas. Consisten en el uso de microorganismos para degradar las sustancias tóxicas, de ser posible, convirtiéndolas en bióxido de carbono, agua y sales minerales inocuas. Los microorganismos normalmente utilizan los compuestos orgánicos tóxicos como fuente de carbono, aunque existen procesos basados en la degradación sintrófica de los tóxicos (Schoeder *et al*; 1999).

En la degradación sintrófica, también denominada cometabolismo, el microorganismo no utiliza el compuesto tóxico ni como fuente de carbono ni como fuente de energía, sino que obtiene ambos a partir de otras sustancias. En el caso del sintrofismo, la degradación no reporta un beneficio aparente para el microorganismo y es el producto de reacciones catalizadas por enzimas que tienen otros usos en el organismo. Por ejemplo; la degradación de Triclorotileno (TCE) por metanotrofos y por *Nitrosomonas europaea*, es la oxidación de este tóxico por las monooxigenasas que los organismos usan para metabolizar sus substratos naturales, metano y amoníaco respectivamente. La bio restauración se usa para la eliminación de tóxicos en suelo y agua. La bio restauración *in situ* consiste, en modificar las condiciones fisicoquímicas en la zona contaminada para que se incremente, tanto el número de microorganismos capaces de degradar los tóxicos

presentes, como su tasa metabólica. El propósito es incrementar la velocidad de degradación de los tóxicos (Fernández, 2000).

2.4.1. Ventajas y desventajas de la biorrestauración

Las ventajas principales de estos procesos son (Fernández, 2000):

1. No producen polvos tóxicos durante el proceso de limpieza, porque no se tiene que excavar y desplazar el suelo contaminado
2. Se pueden tratar grandes cantidades de tierra a la vez.

La desventaja principal es que:

1. El tratamiento *in situ* es más lento que los procesos *ex situ* y pueden durar varios años en el caso de compuestos que se biodegradan muy lentamente.
2. No se pueden aplicar en suelos muy estratificados y arcillosos debido a que estas condiciones no favorecen la buena distribución del aire en toda la zona contaminada.

2.4.2. Biorrestauración *in situ* y *ex situ*

Los métodos *in situ* pueden ser aerobios o anaerobios. En el primer caso las diferencias entre las técnicas estriban en la forma de suministrar el oxígeno necesario para el crecimiento celular. Se perforan pozos de inyección hasta la zona contaminada por donde se introduce aire o soluciones de peróxido de hidrógeno, así como los elementos nutritivos que necesitan los organismos, principalmente fuentes de nitrógeno y fósforo (Aburto *et al*; 2000).

La cantidad, ubicación y profundidad de los pozos depende de las características del suelo y subsuelo. Normalmente se utiliza agua oxigenada cuando el acuífero ya se encuentra contaminado y es necesario tratarlo. Cuando la zona contaminada es muy somera, se pueden usar aspersores para aplicar el agua oxigenada (Peña *et al*; 2001).

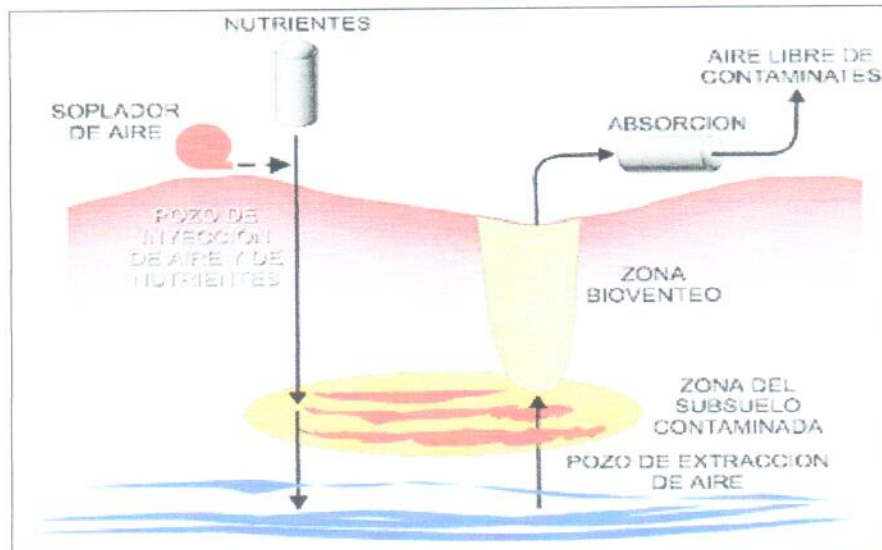


Figura 6.- Proceso de Bioremediación *in situ* de agua y suelo
(Peña *et al.*, 2001)

Biore Restauración *in situ* de acuíferos subterráneos: Los métodos *in situ* consisten en acelerar el crecimiento de los microorganismos biodegradadores presentes en la zona de humedad saturada y normalmente se trata de eliminar los tóxicos presentes en las dos fases del acuífero. Se perfora un pozo hasta el acuífero, se extrae agua contaminada, se le agregan nutrimentos y se satura con oxígeno. La solución se inyecta al acuífero donde los microorganismos degradan los tóxicos. El principal problema que se tiene con esta técnica es que el agua inyectada no se puede distribuir adecuadamente en toda la zona contaminada (Ingeniería Civil y Medio Ambiente, 2001).

Otra forma de biodegradar compuestos orgánicos volátiles presentes en los acuíferos subterráneos, consiste en inyectar aire por abajo del nivel freático y acarrear los tóxicos volátiles, los cuales son degradados por los microorganismos del suelo a medida que la corriente de aire que transporta los tóxicos pasa a través del lecho de suelo. A este proceso se le conoce como bioventeo (Ingeniería Civil y Medio Ambiente, 2001).

Biore Restauración *ex situ* de agua subterránea: Generalmente la biore restauración de agua subterránea contaminada, consiste en extraer por bombeo el agua, tratarla en

bioreactores en la superficie y volverla a inyectar al acuífero una vez que se le ha eliminado el tóxico (Peña *et al*; 2001).

Biorestauración *ex situ* de suelo: Las técnicas *ex situ* se utilizan para tratar contaminaciones que no se pueden eliminar eficientemente *in situ*, ya sea porque la sustancia no se puede degradar o por las características del suelo contaminado, o bien porque el tratamiento se deba terminar en un lapso relativamente corto. Se extrae el suelo contaminado y se le somete a tratamientos que pueden ser en fase semisólida o en fase sólida. En el primer caso se prepara un lodo fluido agregando agua, nutrientes y cultivos densos de microorganismos. El tratamiento se hace en bioreactores aireados y agitados en condiciones controladas (Peña *et al*; 2001).

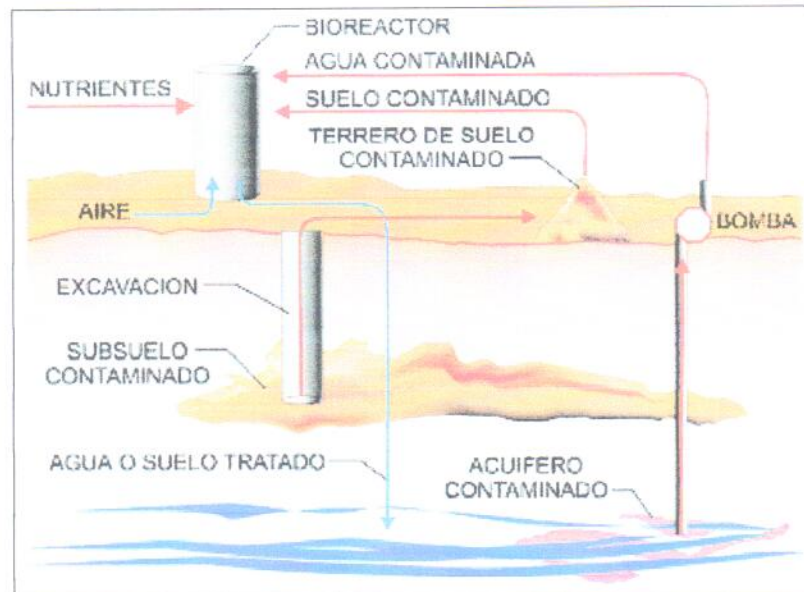


Figura 7. Biorestauración *ex situ* de agua y suelo (Peña *et al.*, 2001)

El tratamiento en fase sólida consiste en apilar el suelo contaminado en lugares acondicionados para este propósito. Lo que se trata de evitar es que los tóxicos puedan emigrar del sitio de tratamiento, ya sea a la atmósfera (vapores o polvos) o al suelo (por filtraciones). Los terreros se humedecen regándolos con agua con nutrientes, se inoculan con cultivos de microorganismos y se ventean agregándoles aire en la base del montículo de suelo contaminado. En algunas técnicas, para facilitar la aireación se

agregan pajas u otros materiales orgánicos que le dé una consistencia menos compacta al terrero en tratamiento (Suthersan, 1997).

2.5. Fitorremediación

Después de analizar diversos conceptos de Fitorremediación (Raskin *et al*; 2000; Saval, 1997; Schnoor, 1998) concluyeron que proviene de la palabra griega *pitón*, que significa “planta” y de la palabra del latín *remediare*, que significa “remediar”. Los estudios se han basado en contaminación química, pero el concepto es más amplio. Para este estudio como “una tecnología sustentable por medio del uso de especies vegetales para limpiar suelos contaminados y el agua, a través de la raíz o de sus partes aéreas, aceleran la actividad microbiológica en el suelo, generan exudados de nutrientes y oxígeno a través de las raíces del suelo, proveen de materia orgánica, estimulan la biodegradación de los contaminantes sean estos derivados orgánicos o inorgánicos, reducen *in situ* la concentración y su peligrosidad, pueden actuar como estabilizadoras del sustrato contaminado, pueden en ocasiones volatilizar y mineralizar los contaminantes; favorecen el manejo de limpieza a través de técnicas de manejo agrícola”.

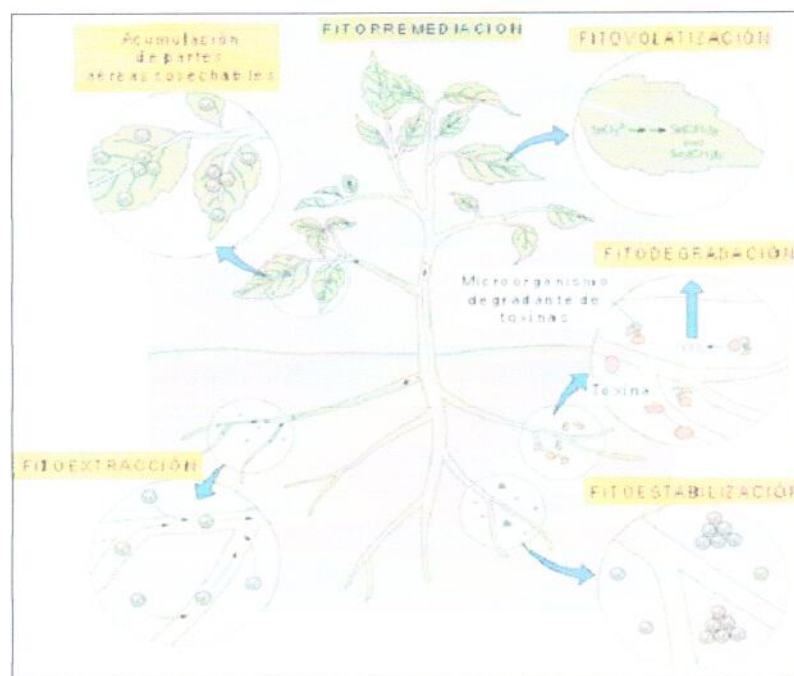


Figura 8. Esquema de fitorremediación (Ketchum, 2003)

La fitorremediación puede y se ha usado para limpiar metales activos, pesticidas, solventes, explosivos, aceite crudo, poliaromáticos, hidrocarburos, desagües de mina de ácido y contaminación radioactiva, entre otros. Es una forma segura y barata de limpiar contaminantes. Las plantas pueden crecer, cosecharse y algunas veces todavía aprovecharse ó quedan como sustento de materia orgánica para la siguiente sucesión (Cámara, 2000).

2.5.1. Historia de la fitorremediación

El uso de remediación basados en plantas, no es nuevo, en realidad es el primer sistema de remediación que se baso en plantas fue instalado hace 300 años en Alemania para el tratamiento de desechos municipales (Hartman, 1975; citado por Cunningham *et al.*, 1996). Aunque desde hace mucho tiempo, ya se utilizaban estos sistemas, no eran considerados como tema de investigación, ya que Bollag *et al.* (1994) mencionan que la fitorremediación es una nueva área de investigación que consiste en el uso de plantas para destoxificar sitios con contaminantes orgánicos e inorgánicos.

Las plantas pueden ser usadas particularmente para la limpieza de suelos *in situ* con contaminación de menos de dos metros de profundidad. Las plantas han sido usadas con éxito para el tratamiento de desechos de aguas, pero su habilidad para remover xenobióticos ha sido atribuida a la asociación de microorganismos con sus raíces. Es así como las investigaciones sobre biorremediación de suelos contaminados, en su mayor parte, se han enfocado sobre el papel que desempeñan los microorganismos. Sin embargo, también se ha demostrado que las plantas pueden ser muy importantes en la remoción directa de contaminantes. Estas pueden remover físicamente del suelo a los contaminantes por la absorción o translocación de éstos dentro de sus tejidos ya que existen procesos metabólicos que pueden transformar o mineralizar a los contaminantes.

Las plantas también pueden concentrar contaminantes orgánicos e inorgánicos en su biomasa, mismos que son removidos al cosechar las plantas. Además también pueden remover indirectamente a los contaminantes al incrementar la actividad biológica del

suelo a través de las interacciones rizosféricas, relaciones con bacterias fijadoras de nitrógeno, contribuciones de material vegetal muerto y la provisión de un hábitat para muchos otros organismos que viven en el suelo (Bollag *et al.*, 1994).

La fitorremediación permite el tratamiento de muchos sitios que no pueden ser manejados con métodos comunes disponibles; conserva el suelo de la superficie al reducir la erosión y los movimientos del agua en el suelo (Nuñez *et al.*, 2004).

Conforme al análisis de la fitorremediación para suelos contaminados por hidrocarburos, el cuadro hace una comparación de las ventajas y desventajas del uso de la tecnología de la fitorremediación (Cuadro 6).

Cuadro 6. Ventajas y desventajas de la Fitorremediación

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Tecnología barata y efectiva	No todos los contaminantes o suelos contaminados son indicados debido a que algunos contaminantes están muy lixiviados, hay mucha heterogeneidad en el sitio y el perfil de la contaminación es muy complejo.
Aporta abundantes restos orgánicos al suelo dándole un apreciable contenido en humus	Existen límites en la profundidad del sitio, la mayoría de las raíces de las plantas son relativamente poco profundas.
Mediante el sistema radicular y aéreo, actúa como freno para la erosión del suelo.	La textura del suelo, el contenido de agua o los grados de respiración microbiana son altos, las raíces no pueden penetrar, excepto para plantas con respiración anaerobia.
Actúa como medio para fijar, absorber y estimular la degradación de los contaminantes. A nivel mundial se pueden establecer relaciones entre las grandes comunidades vegetales y los tipos de suelo: desierto, estepa, pradera y bosques. Las plantas son utilizadas como prospectores geoquímicas.	Alta concentración de los contaminantes menor capacidad para fitorremediar.

La extracción de los metales por la raíz de las plantas y su acumulación en las partes aéreas favorece el manejo de materiales dañinos durante su limpieza. La secreción de exudados por las raíces que estimulan el crecimiento de diversas bacterias y hongos en la rizósfera, los cuales pueden actuar como biorremediadores (Nuñez *et al.*, 2004).

Las ventajas económicas y medioambientales proporcionan una excelente razón para el uso de este tratamiento en sitios contaminados. Aunque existe el inconveniente de que en los experimentos a escala no son fácilmente controlables; se logra tener éxito si se consideran y se llevan al óptimo los factores físicos, químicos y biológicos, analíticos e incluso estadísticos (Blackburn *et al.*, 1993).

El inconveniente principal en el uso de esta tecnología es que no es bueno para todos los sitios. Si la contaminación corre demasiado profundo, las plantas no podrán solucionarlo en gran manera, aunque se han reportado que las raíces de algunas plantas alcanzan profundidades hasta de 60 m, la mayoría de las plantas son relativamente poco profundas. Se han hecho estudios donde el agua subterránea se bombea afuera y entonces es tratada con plantas (EPA, 2000).

A pesar de las enormes expectativas que ha suscitado la Fitorremediación, esta técnica adolece de las limitaciones propias al manejo de organismos vivos como la superficie de cultivo (tipo de suelo y pH del mismo), disponibilidad de nutrientes, tolerancia a la acumulación de altas concentraciones de los compuestos que remedian y la naturaleza de éstos, ya que se ha observado que en el caso de moléculas hidrofóbicas el proceso de absorción es muy poco eficiente. Además hay un desconocimiento total de los efectos que puede tener la ingesta de estas plantas por parte de los animales y su consiguiente entrada en la cadena alimentaría. La biotecnología puede ser la solución para paliar, total o parcialmente, estas limitaciones incrementando aún más la eficacia y rentabilidad de la fitorremediación (Rubio, 2002).

2.5.2. Tecnologías de fitorremediación

2.5.2.1. Fitoextracción

También llamado como fitoacumulación, biomagnificación o fitominería; consiste en plantas que absorben por las raíces y translocan a los tallos y hojas, metales pesados que están depositados en el suelo (Ag, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Zn), (Kumar *et al.*, 1995); posteriormente cosechados por métodos agrícolas convencionales (Gleba *et al.*, 1999).

Desarrollando la fitoextracción, los científicos se han enfocado a especies de plantas que tienen características deseables como alta producción de biomasa, fácil manipulación, caracterización genética, y prácticas de cultivo establecidas.

Las plantas son conocidas como metalofitas o plantas acumuladoras de metales (Nuñez *et al.*, 2004). Generalmente estas pertenecen a la familia Brassicaceae que son las más utilizadas en la extracción de metales (Cunningham *et al.*, 1996).

Cuadro 7. Plantas acumuladoras de metales pesados

PLANTA	ELEMENTO	CONCENTRACIÓN %
<i>Alyssun bertolonii</i>	Ni	10
<i>Thlaspi calaminare</i>	Zn	10
<i>Pimelea suter</i>	Cr	1-3
<i>Crotolaria cobatica</i>	Co	1-3
<i>Astragalus racemosus</i>	Se	1-3
<i>Arabis stricta</i>	Sr	1-3
<i>Encinta leptostachy</i>	U	1-3
<i>Becium homlei</i>	Cu	0,1-3
<i>Betuna papyrifera</i>	Hg	0,1-3
<i>Pinus sibericus</i>	W	1-3
<i>Equisetum arvense</i>	Zn	1-3

Fuente: Faz, 2000.

2.5.2.2. Rizofiltración

Consiste en el uso de las raíces de las plantas para adsorber, absorber, concentrar y precipitar metales pesados desde el agua. La habilidad para absorber diferentes iones metálicos es una propiedad común de todas las raíces de las plantas pero varía entre las especies de plantas.

En México, se ha utilizado en cultivos hidropónicos, raíces de plantas terrestres con alta tasa de crecimiento y área superficial para extraer metales pesados de las aguas residuales contaminadas (Nuñez *et al.*, 2004).

Las raíces de los girasoles han sido usadas para tratar aguas conteniendo plomo, uranio, estroncio, cesio, cobalto y zinc en concentraciones debajo de los estándares de agua aceptados (Schnoor, 1998). Algunos sitios contaminados con: plomo, cadmio, cobre,

zinc, cromo, uranio, cesio y estroncio son tratados siguiendo esta tecnología (Salt *et al.*, 1995).

Un acercamiento de la rizofiltración ha sido para remover uranio de agua del subsuelo en sitios de Ashtabula y para remover cesio y estroncio desde un estanque cercano al reactor de Chernobyl (Schnoor, 1998). La presencia de otros iones metálicos no interfiere sustancialmente con la rizofiltración de plomo, cesio o estroncio. Esto sugiere que la rizofiltración puede ser usada para remover metales desde mezclas conteniendo diferentes iones metálicos que están probablemente ocurriendo en la lluvia de la superficie y en el subsuelo.

En algunos casos, indican el papel que tienen las comunidades microbianas durante el proceso de remediación. Así, se hace evidente que la fitorremediación es un proceso complejo que involucra la participación de la comunidad microbiana asociada a su sistema de raíz.

2.5.2.3. Fitoestabilización

También llamado este proceso como fitodescontaminación, fitodegradación, fitotransformación ó Biorremediación enzimática. Se refiere a plantas que estabilizan el suelo mediante microorganismos los contaminantes en los suelos, de este modo haciéndolos menos nocivos. La estrategia de la comunidad microbiana tiene consideraciones particulares, determinadas principalmente por el tipo de contaminante y el sustrato a tratar: suelos, sedimentos o agua. Esta tecnología esta dedicada principalmente a las medidas correctivas para contaminantes orgánicos. Algunas plantas que pueden llevar a cabo este proceso son: mostaza (*Brassica juncea*), cañuela (*Festuca rubra*), y soya (*Glycine spp.*) (Salt *et al.*, 1995 y EPA, 2000).

Se han realizado estudios para determinar especies vegetales para la degradación de hidrocarburos del petróleo y sus derivados.

En la degradación de hidrocarburos del petróleo las plantas y los microorganismos están directa e indirectamente implicados; aunque la degradación pueden llevarla a cabo independientemente uno del otro, la literatura sugiere que la interacción entre las plantas y microorganismos es el mecanismo responsable para la degradación de petroquímicos (Frick *et al.*, 1999).

Cuadro 8. Especies vegetales utilizadas en la rehabilitación de suelos

NOMBRE COMÚN	NOMBRE CIENTÍFICO	PETRÓLEO O DERIVADOS Y SU CONCENTRACIÓN	REFERENCIA
Pasto	<i>Panicum miliaceum</i>	Petróleo 20 000 mg kg ⁻¹	Breus <i>et al.</i> (2000)
Pasto Alemán	<i>Echinochloa polystachya</i>	Petróleo 115 211 a 322 841 mg kg ⁻¹	Rivera (2001)
Maíz	<i>Zea mays</i>	Petróleo crudo 25000 mg kg ⁻¹	Quiñones <i>et al.</i> (2001)
Pasto	<i>Panicum sp.</i>	Petróleo 1500 a 3 500 mg kg ⁻¹	Hernández <i>et al.</i> (2000)
Rábano	<i>Raphanus sativus.</i>	Pireno 81 mg kg ⁻¹	Hangs- Holger y Alexander (2000)
Mimosa	<i>Chamaecrista nictitans</i>	http	Hernández <i>et al.</i> (2000b)
Fescue	<i>Festuca arundinacea</i>	Naftaleno 0.5 a 5 mg kg ⁻¹	Schwab <i>et al.</i> (1998)
Alfalfa	<i>Medicago sativa</i>	Petróleo 20 g kg ⁻¹	Wiltse <i>et al.</i> (1998)
Frijol	<i>Phaseolus vulgaris</i>	Kerosenó (0,500, 2 500 y 5 000 mg kg ⁻¹	Hernández <i>et al.</i> (1998a).
Girasol	<i>Helianthus annus</i>		
Trigo	<i>Triticum aestivum</i>	Petróleo 6 000 a 12 000 mg kg ⁻¹	Chaineau <i>et al.</i> (1997)
Trébol	<i>Trifolium repens</i>		
Frijol	<i>Phaseolus vulgaris</i>		
Maíz	<i>Zea mays</i>	Petróleo 10 000 a 30 000 mg kg ⁻¹	Nichols <i>et al.</i> (1996)
Ryegrass	<i>Lolium perenne</i>	Mezcla de hidrocarburos 5 000 mg kg ⁻¹	Günther <i>et al.</i> (1996)
Cebada	<i>Hordeum vulgare</i>		
Chicharo	<i>Pisum arvense</i>	Petróleo 55 g kg ⁻¹	Xu y Jonson (1995)
Crisantemo	<i>Chrysanthemum vulgare</i>	Hidrocarburos polinucleo aromáticos 12 300 µgkg	Edwards (1983)
Pastos	<i>Andropogon gerardii</i>		
	<i>Sorghastrum nutans</i>		
	<i>Panicum virgatum</i>	Mezcla de hidrocarburos 0.0005 a 0.014 mg L ⁻¹	April y Sims (1990)
	<i>Elymus canadienses</i>		
	<i>Schizachyrium scoparius</i>		
	<i>Bouteloua curtipendula</i>		
	<i>Andropogon smithii</i>		
Haya	<i>Fagus sp.</i>	PAH's 66 a 2 230 µg Kg	
Avena	<i>Avena sativa</i>	PAH's 8 a 1,324 µgKg	
Tabaco	<i>Nicotiana tabacum</i>		
Espinaca	<i>Spinaceae oleracea</i>	Benzo (a) pireno 12 a 20 µgKg	
Alfalfa	<i>Medicago sativa</i>		
Fecus	<i>Festuca arundinacea</i>	PAH's	Schwad y Banks (1994)
Sorgo	<i>Sorghum vulgare</i>		
Pasto sudan	<i>sudanense</i>		
Soya	<i>Gyicine max</i>	Benzo (a) Pireno y antraceno 2 a 10 mg kg ⁻¹	Goodin y Webber (1995)
Col	<i>Brassica oleracea</i>	PAH's totales 17.2 mg kg ⁻¹	Wild y Jones (1992)
Zanahoria	<i>Daucus carota</i>	30 µg PAH's	Wild <i>et al.</i> (1992)
Tubérculo de papa	<i>Solanum tuberosum</i>		
Lechuga	<i>Lactuca sativa</i>		

Fuente: Hernández, 2002

Al respecto, Manahan (1999) menciona que en la zona rizosférica se puede incrementarse hasta 10 veces la biomasa microbiana por unidad de volumen en comparación con el suelo no rizosférico, por lo que los contaminantes pueden ser degradados con más rapidez (Figura 9).

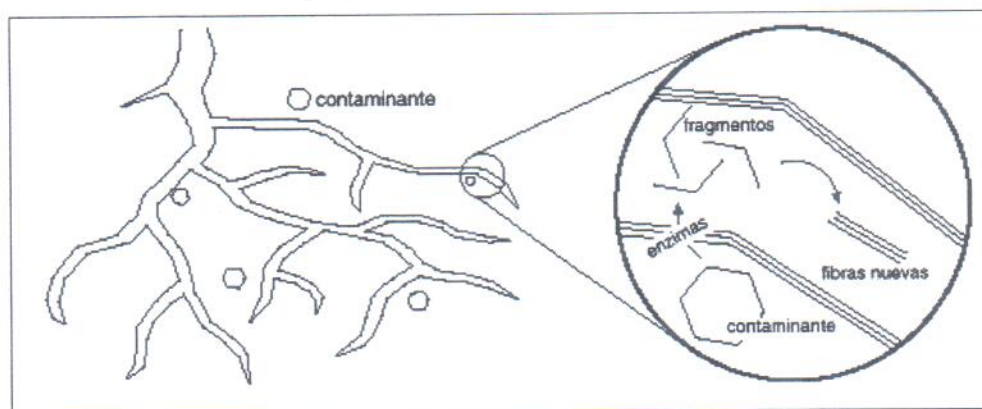


Figura 9. Enzimas producidas en la rizosfera.
(Ingeniería Civil y Medio Ambiente, 2004)

Existen varios estudios que muestran mayores poblaciones y actividad microbiana en suelos rizosféricos en comparación con aquellos que no presentan plantas, como resultado del efecto rizosférico en la fitorremediación de hidrocarburos de sitios contaminados con petróleo Frick *et al.* (1999). Se sugiere que las raíces de las plantas estimulan a la flora microbiana para que esta incremente la degradación de los hidrocarburos. Radwan *et al.* (1998) mencionaron que la rizosfera de muchas plantas contienen un gran número de bacterias hidrocarbonoclastas y esto se observa más cuando las plantas crecen en suelos contaminados con hidrocarburos en comparación con los suelos que no lo están. Estas investigaciones sugieren que la fitorremediación puede ser una estrategia aprovechable para la limpieza de suelos contaminados.

Las enzimas de las plantas pueden tener efectos significantes mientras la planta esta viva, y aún después de que ésta muere (Cunningham *et al.*, 1996). Al respecto Yee *et al.* (1998), mencionaron que el trigo es capaz de estimular a la enzima tolueno- o- monooxigenenasa por su expresión mediante la bacteria *Pseudomonas fluorescens* y degradar compuestos como el tricloroetileno.

Cuadro 9. Enzimas excretadas por las plantas en suelos contaminados

ENZIMA	ESTADO DE DESARROLLO	CONTAMINANTE DEGRADADO
Nitroreductasa	Ensayos en campo. Plantas crecidas en sustratos a nivel laboratorio.	TNT, dinitromonoaminotolueno y mononitrodiaminotolueno
Lacasa Dehalogenasa	Ensayos en campo. Plantas crecidas en sustratos a nivel laboratorio.	Triaminotolueno Etileno, metileno, hexacloroetano, percloroetileno, TCE, dicloroetileno, cloroformo
Nitrilasa	Plantas crecidas en sustratos a nivel laboratorio.	4-clorobenzonitrilo

Fuente: Hernández, 2002

2.5.2.4. Fitovolatilización

En este proceso las plantas extraen metales volátiles (por ejemplo el mercurio y el selenio desde el suelo y los volatilizan desde el follaje), se incluyen los metaloides, radionúclidos. Estudios afirman que algunas enzimas degradan los solventes clorados así como el tricloroetileno (TCE) y otros herbicidas (Rubio, 2001).

2.5.3. Fitorremediación acuática

Pueden ser de cuatro tipos según Nuñez *et al* (2004):

1. *Humedales contruidos*: se definen como un complejo de sustratos saturados, vegetación emergente y subemergente, animales y agua que simula los humedales naturales, diseñados y hechos por el hombre para su beneficio.
2. *Sistema de tratamiento con plantas acuáticas flotantes*: Pueden ser estanques semiconstruidos o naturales, donde se mantienen plantas flotantes para tratar aguas residuales.
3. *Sistema de tratamiento integral*: es una combinación de los dos sistemas anteriores.
4. *Sistema de rizofiltración*: ya mencionado anteriormente.

Se ha demostrado que estos sistemas pueden remover eficientemente fosfatos, nitratos, fenoles, pesticidas, metales pesados, elementos radioactivos, fluoruros, bacterias y virus, de aguas residuales municipales, agrícolas e industriales, incluyendo las industrias:

lechera, de pulpa y papel, textil, azucarera, de curtiduría, de destilería, aceitera, de galvanizado y metalurgia (Nuñez *et al.*, 2004).

2.5.4. Tipos de plantas acuáticas para la fitorremediación

Con base en sus formas de vida, las plantas utilizadas en los sistemas de fitorremediación acuática se clasifican en tres grupos:

1. *Emergentes*: las raíz de estas plantas está enterrada en los sedimentos y su parte superior se extiende hacia arriba de la superficie del agua. Sus estructuras reproductoras están en la porción aérea de la planta. Ejemplos: carrizo (*Phragmites communis*), platanillo (*Saggitaria latifolia*) y tule (*Typha domingensis*). Esta última especie ha habido reportes que concentra 552 miligramos de cianuro y 15 miligramos de mercurio por kilogramo seco en el Lago de Chapala (Burton, 1997).
2. *Flotantes*: Se subdividen en dos grupos:
 - 2.1. *Plantas de libre flotación (no fijas)*: Sus tallos y hojas se desarrollan sobre la superficie del agua. Sin embargo, sus raíces no están fijas en ningún sustrato y cuelgan en la columna de agua. Sus estructuras vegetativas y reproductivas se mantienen emergentes. Ejemplos: lenteja de agua (*Lemna* sp. y *Salvinia mínima*) y lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) que alcanza captar concentraciones de 178 miligramos de cianuro, 6 miligramos de cromo y 4 miligramos de plomo por kilogramos seco en el lago de Chapala (Burton, 1997).
 - 2.2. *Plantas de hoja flotante (fijas)*: Tiene sus hojas flotando sobre la superficie del agua, pero sus raíces están fijas en los sedimentos. Ejemplo: nenúfares (*Nymphaea elegans* y *Nymphoides fallax*).
 - 2.3. *Sumergidas*: Se desarrollan debajo de la superficie del agua o completamente sumergidas. Sus órganos reproductores pueden presentarse sumergidos, emergen o quedan por encima de la superficie del agua. Ejemplos: bejuquillo (*Ceratophyllum demersum*), hidrilla o maleza (*Hydrilla verticillata*) y pastos (*Phyllospadix torreyi*).

2.5.5. Criterios de selección de plantas para la fitorremediación

Para definir la especie de plantas para la remoción de contaminantes, depende principalmente del estado de crecimiento de las plantas, su estacionalidad y el tipo de metal o compuesto orgánico a remover. Las plantas deben tener las siguientes características:

1. Ser tolerantes a altas concentraciones de metales
2. Ser acumuladoras de metales
3. Tener una rápida tasa de crecimiento y alta productividad
4. Ser especies locales, representativas de la comunidad natural
5. Ser fácilmente cosechables (Nuñez *et al.*, 2004).

2.5.6. Dinámica del proceso de fitorremediación acuática en tratamiento de aguas residuales.

Se ha estudiado que los principales procesos que ocurren en el tratamiento de aguas residuales, es la degradación de la materia orgánica que llevan a acabo los microorganismos que viven sobre y alrededor de las raíces de las plantas. Los productos de degradación son absorbidos por las plantas junto con nitrógeno, fósforo y otros minerales. A su vez, los microorganismos usan como fuente alimenticia parte o todos los metabolitos desechados por las plantas a través de su raíz (ver Cuadro 10).

Cuadro 10. Plantas acuáticas en el tratamiento de aguas residuales

Parte vegetativa	Función
Raíces o tallos sumergidos	Sustrato para el crecimiento bacteriano.
	Medio para la filtración y adsorción de sólidos.
	Bioabsorción y acumulación de contaminantes.
	Atenúan la luz del sol y así pueden evitar el crecimiento de algas suspendidas.
Tallos u hojas emergentes	Reducen los efectos del viento sobre el agua.
	Reducen la transferencia de gases y calor entre la atmósfera y el agua.
	Transfieren oxígeno desde las hojas a la raíz.
	Transfieren y acumulan contaminantes.

Fuente: Reddy y Smith, 1987

Nuñez *et al.* (2004) han realizado estudios para determinar si las *fitoquelatinas* (peptidos ricos en cisteina, sintetizados enzimáticamente. Se derivan de glutatión y consisten de

sólo tres aminoácidos: ácido glutámico, cisteína y glicina). No se puede establecer aún con claridad cuál es el papel de las fitoquelatinas. Sin embargo, se asume que su principal función tiene que ver con la detoxificación de metales no esenciales y metaloides con marcada afinidad por el azufre. Igualmente, las evidencias sugieren que las fitoquelatinas también están involucradas en la homeostasis de los metales esenciales (micronutrientes), particularmente de hierro, cobre y zinc. Se sabe que una amplia variedad de metales pueden inducir la formación de fitoquelatinas, entre ellos el cadmio, níquel, cobalto, plomo, plata, zinc, cobre, aluminio, arsénico, selenio y mercurio. Sin embargo, la quelación de metales por fitoquelatinas sólo ha sido verificada para unos cuantos elementos y en un número reducido de plantas.

El mecanismo de detoxificación de metales es más complejo que una simple quelación (Girard, 1988). Sin embargo, Nuñez *et al.* (2004) indican que el ión puede activar la enzima fitoquelatina sintetasa, iniciando la formación de las fitoquelatinas, las cuales lo acomplejarán y entonces presumiblemente será transportado a las vacuolas, donde posiblemente formará una agregación más compleja con sulfuros o ácidos orgánicos. Si las plantas no fabrican las fitoquelatinas, los metales inhibirán su crecimiento y consecuentemente morirán.

La secuencia de eventos en el proceso de detoxificación, así como el quelante involucrado, estará determinada tanto por el tipo de metal como por la especie de planta. Por ejemplo las plantas del género *Arabidopsis*, una de las más estudiadas, responde de manera diferente cuanto es expuesta al zinc y el níquel; el primero es acomplejado por las metalotioneínas, y el segundo por las histidinas, demostrando que una misma planta puede desplegar mecanismos alternos de detoxificación, dependiendo del metal (Nuñez *et al.*, 2004).

La mayoría de los estudios sobre fitoquelatinas y metalotioneínas se han concentrado en plantas terrestres hiperacumuladoras de metales y en plantas cultivables de importancia económica. Sin embargo, a pesar de ser las más estudiadas, aún quedan muchas interrogantes por resolver sobre sus mecanismos de tolerancia y detoxificación. Cobbett

(2000) señala que aún falta por responder el papel de la fitoquelatina sintetasa y de las fitoquelatinas en diferentes especies, y que el conocimiento de las bases moleculares de la biosíntesis de fitoquelatinas será útil para optimizar el proceso de fitorremediación.

Respecto a las plantas acuáticas, hasta la fecha sólo se ha demostrado la síntesis de fitoquelatinas en algas marinas y de agua dulce. Aún cuando se han realizado numerosos estudios con el lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) y la lenteja de agua (*Lemna* spp), plantas comúnmente empleadas en los sistemas de fitorremediación acuáticos, poco se conoce sobre sus mecanismos fisiológicos involucrados en el proceso de destoxificación de metales pesados, debido a que la mayoría de las investigaciones se han limitado a determinar la capacidad de bioabsorción, acumulación y tolerancia (Moreno *et al.*, 2001).

2.5.7. La fitorremediación en México

En México aún es incipiente de la fitorremediación. En el Cuadro 11 se presenta una relación de proyectos y líneas de investigación desarrollados en este campo que son o han sido financiados por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) a través de sus programas regionales o por programas institucionales internos. En general, los proyectos sobre fitorremediación acuática en su mayoría se han enfocado a metales pesados, mientras que los relacionados con fitorremediación de suelos se ha concentrado en los hidrocarburos del petróleo.

Se han realizado diversos estudios para la fitorremediación de diversos contaminantes, los principales son los clorados, ácidos, solventes, metales pesados e hidrocarburos. En su mayoría estos estudios son realizados en laboratorio, es decir *ex situ* fuera de las zonas afectadas y no se han llevado a cabo pruebas en las áreas de estudio, así como aplicaciones de estos estudios en grandes extensiones.

Cuadro 11. Descontaminación en México por medio del uso de plantas

Líneas de investigación y proyectos en desarrollo	Contaminante	Medio	Especie	Institución	Estado	Año
Fitorremediación de aguas residuales de granjas porcinas y de procesamiento de café.	Materia orgánica y nutrientes	Agua	No indica	Inecol	Veracruz	1994
Bioabsorción de plomo, cadmio y arsénico empleando dos plantas acuáticas flotantes tropicales (<i>Spirodela polyrrhyza</i> y <i>Salvinia minima</i>).	Metales pesados	Agua	<i>Spirodela polyrrhyza</i> y <i>Salvinia minima</i>	Inecol	Veracruz	2001
Desarrollo de un bioadsorbente a partir de la biomasa de <i>Spirulina</i> sp.	Metales pesados	Agua	<i>Spirulina</i> sp	Inecol	Veracruz	2001
Mejoramiento de la capacidad de remoción de plomo y arsénico por plantas acuáticas.	Metales pesados	Agua	Plantas acuáticas	CICY	Yucatán	2001
Remoción de contaminantes y patógenos de aguas residuales por el método vertical de raíces, utilizando plantas de la región.	Materia orgánica y patógenos	Agua	Plantas nativas	UADY	Yucatán	98-02
Fitorremediación de metales pesados en el tanque Tenorio y su impacto ambiental.	Metales pesados	Agua	No se mencionan	UASLP	San Luis Potosí.	2002
Proceso de fitorremediación por especies halófitas (manglares)	No especificado	Sistema estuario	Especies halófitas manglares	UANL	Nuevo León	1998
Fitorremediación de un suelo agrícola contaminado con cadmio	Metales pesados	Suelo	No se mencionan	UANL	Nuevo León	1999
Producción de fitoquelatinas por <i>Salvinia minima</i> expuesta a plomo y arsénico	Metales pesados	Agua	<i>Salvinia minima</i>	CICY	Yucatán	2001
Asimilación de contaminantes ambientales por especies vegetales en el proceso de fitorremediación.	Metales pesados	Suelo	Especies vegetales	UANL	Nuevo León	2000
Remoción de arsénico de efluentes mineros y aguas subterráneas por las plantas nativas acumuladoras mediante la implementación, a escala piloto de humedales construidos.	Metales pesados	Agua	Plantas nativas	Cimav	Chihuahua	2001
Fitorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos.	Hidrocarburos del petróleo	Suelo	No se menciona	IMP	México, D. F.	1996
Ciclos biogeoquímicos de cadmio y plomo. Adición de nitrógeno al suelo y su efecto de la absorción y acumulación de metales pesados en <i>Ricinos communis</i>	Metales pesados	Suelo	<i>Ricinos communis</i>	UANL	Nuevo León	2002

Fuente: Nuñez *et al.* 2004.

Cuadro 11. Continuación

Líneas de investigación y proyectos en desarrollo	Contaminante	Medio	Especie	Institución	Estado	Año
Remoción electroquímica de metales de la biomasa de las plantas o bioabsorbentes	Metales pesados	Agua	Plantas bioabsorbentes	Cideteq	Querétaro	2001
Microorganismos simbióticos de la rizósfera de plantas para la fitorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos del petróleo.	Hidrocarburos del petróleo	Suelo	No se menciona	CP (Irenat)	Estado de México	1997
Fitorremediación de suelos tropicales pantanoso contaminados con hidrocarburos	Hidrocarburos del petróleo	Suelo	No se menciona	UAM-I	México, D. F.	2002
Fitoextracción de cadmio y zinc de suelos	Metales pesados	Suelo	No se menciona	UAM_A	México, D. F.	2002
Caracterización de genes vegetales con uso potencial en la Fitorremediación	Hidrocarburos del petróleo	Suelo	No se menciona	UAEM (CEIB)	Morelos	2002
Fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados	Metales pesados	Suelo	No se menciona	UAEM (CEIB)	Morelos	2002

Fuente: Nuñez *et al.* 2004

2.6. Restauración ecológica

2.6.1. Concepto de restauración ecológica

También llamada restauración ambiental, Sarre (1995), explica que existen tres posiciones diferentes con respecto al significado de la restauración ecológica. Una visión fundamentalista de ésta se refiere a la restauración como un regreso a las condiciones existentes en las comunidades naturales originales de cada región, incluida la diversidad biológica original incluso logrando nuevamente cierta estabilidad sin necesidad de manejo posterior. El retorno a la situación original puede aún ser posible en zonas perturbadas de lugares como reservas de la naturaleza en las que sólo una parte de la comunidad original ha sido alterada; en cambio, en muchos sitios sólo será posible aplicar una segunda opción más práctica y que puede combinarse con actividades productivas.

En este caso la restauración ecológica estaría dirigida a tratar de recuperar las principales funciones ambientales del ecosistema original, que permitan mantener la estabilidad en la fertilidad, la conservación del suelo y el ciclo hidrológico, aunque parte de la diversidad se haya perdido, la estabilidad del sistema tenga que ser manejada y algunas especies extrañas previamente inexistentes hayan ingresado al área (Sarre, 1995).

La restauración del paisaje es la tercera forma de vislumbrar la restauración. En este caso se busca desarrollar un paisaje atractivo y salubre para reemplazar otro que no lo es; por ejemplo, en un relleno sanitario. Los niveles de destrucción de la cubierta vegetal, del suelo fértil y de la capacidad de regeneración de la vegetación nativa marcarán la pauta del origen y las características biológicas de las especies que podrán usarse para cada localidad. Lugares con un nivel de deterioro relativamente leve podrían conservar los mecanismos naturales de regeneración o cicatrización como la presencia de un banco edáfico de semillas y estructuras vegetativas vivas, dispersión de semillas y un suelo aún fértil. Indica que un nivel de deterioro mayor podría requerir de manipulaciones que incluyen el mejoramiento ambiental del sitio mediante el uso de especies de plantas que se adapten a las cualidades del suelo y del microclima, combinadas con la reactivación de la lluvia de semillas procedentes de zonas conservadas cercanas a través de medios biológicos. Finalmente, en áreas muy alteradas o en las que se presenta una invasión natural o inducida de especies de plantas foráneas se podrían requerir de acciones como: eliminación de la vegetación invasora, mejoramiento ambiental del sitio por medio de especies vegetales locales o introducidas, adecuadas para el fin buscado, e incluso se puede requerir cambios utilizando técnicas de ingeniería del paisaje para mejorar las condiciones de establecimiento de las plantas que se utilicen en la reforestación (Dobson *et al*; 1997).

2.6.2. Restauración ecológica con especies nativas

Sarre (1995) indican que cuando se reforesta para restaurar sitios con especies exóticas se tienen resueltos los problemas de domesticación y disponibilidad de propágulos, sin embargo, los resultados obtenidos con éstas obligan a replantear la necesidad de

domesticar y aprender a propagar especies nativas, para lo cual es necesario realizar un inventario de las especies que presenten las propiedades biológicas y ecológicas más adecuadas para cada clima y condición ambiental del país.

Para hacer un uso exitoso de las especies nativas de cada región en programas de desarrollo de sistemas agrosilvopastoriles, restauración ecológica y reforestación es indispensable profundizar nuestro conocimiento sobre la biología, la ecología, la propagación y el manejo de las especies disponibles, a fin de posibilitar la domesticación de dichas especies y desarrollar técnicas eficientes de propagación, e incluso llegar a mejorar por selección sexual, clonal o ingeniería genética algunas de sus características mas valiosas. Es importante también tomar en consideración la utilidad de las especies para la población local, ya que ello redundará en una mejor conservación de las zonas restauradas (Brown *et al*; 1994).

En contraste, varias especies de árboles y arbustos de los géneros *Caesalpinia*, *Enterolobium*, *Gliricidia*, *Guazuma*, *Leucaena* presentes en México han sido empleadas para reforestación restauración y agroforestería en otros continentes como África (Krishnamurthy *et al*; 1998; Lamb, 1994).

2.6.2. 1. Sistemas agrosilvopastoriles.

Krishnamurthy *et al*(1998) indican que una manera en que podemos utilizar plantas silvestres domesticadas de forma combinada con la producción agropecuaria es mediante los sistemas agrosilvopastoriles, que pueden tener una estructura espacial muy variable dependiendo del tipo de ecosistema de que se trate y del propósito perseguido en su diseño. Se trata de combinaciones de cultivos de árboles y arbustos con cultivos o pastizales, que varían en secuencia temporal, composición de especies, arreglo espacial y en las interacciones biológicas que se dan entre sus componentes. Si estos sistemas están bien diseñados, sus componentes leñosos pueden prestar servicios valiosos como: sombra, protección al cultivo contra el viento, control de erosión eólica, e hídrica, reducción de la evapotranspiración, acumulación de materia orgánica en el suelo,

fijación del nitrógeno atmosférico en el suelo y por la vegetación, reciclaje eficiente de nutrientes minerales, retención e infiltración del agua en el suelo y un hábitat adecuado para algunas especies nativas, al mismo tiempo que se obtienen productos suplementarios a los que origina el cultivo o el ganado que se produce en el sitio .

Estos productos pueden ser: forrajes, leña y carbón, postes, abonos verdes, vainas comestibles, miel, árboles maderables y frutas, colorantes, fibras, entre otras cosas. Las otras ventajas que proporcionan los sistemas agrosilvopastoriles son una mejor conservación del suelo y reducción en el uso de fertilizantes. Desafortunadamente, presiones de índole económica o estructuras sociales derivadas de las formas de tenencia de la tierra dificultan la implementación de estos sistemas (Krishnamurthy *et al*, 1999).

Las leguminosas (Fabaceae) juegan un papel primordial en los sistemas agrosilvopastoriles tropicales por su capacidad para la fijación del nitrógeno molecular atmosférico en moléculas orgánicas; sin embargo, lo ideal es lograr una combinación de árboles cuya hojarasca tenga diferentes niveles de concentración de carbono y nitrógeno, ya que esto propicia una mejor calidad del humus formado y por lo tanto, con el tiempo, la mejora en la capacidad de intercambio catiónico en el suelo y la estructura de los conglomerados edáficos cuya forma tamaño y disposición determinan la erosividad y fertilidad (Lugo, 1988).

2.6.2.2. Domesticación de árboles

Ya se trate de restauración ecológica, reforestación o desarrollo de sistemas agrosilvopastoriles, la domesticación es la primera etapa del manejo de los árboles. Utilizamos aquí la palabra domesticación con un sentido diferente de los etnobotánicos (Krishnamurthy *et al*, 1998).

1. Adopción de plantas nativas o foráneas buscando en la flora disponible las plantas que puedan proporcionarnos el servicio deseado.
2. Identificar y capturar el germoplasma disponible.
3. Buscar fenotipos óptimos para el propósito establecido.

4. Optimizar los métodos de propagación.

5. Mejorar las cualidades valiosas.

Las plantas valiosas para la restauración y la reforestación deben presentar las siguientes cualidades:

1. Ser de fácil propagación.
2. Resistir condiciones limitantes, como baja fertilidad, sequía, suelos compactados, pH alto o bajo, salinidad, etc.
3. Tener crecimiento rápido y buena producción de materia orgánica como hojarasca, de preferencia con una relación alta de C/N.
4. Tener alguna utilidad adicional a su efecto restaurador; por ejemplo, producir leña, carbón, forraje nutritivo, vainas comestibles, madera o néctar.
5. Nula tendencia a adquirir una propagación malezoide invasora, incontrolable. Presencia de nódulos fijadores de nitrógeno o micorrizas que compensen el bajo nivel de nitrógeno, fósforo y otros nutrientes en el suelo.
6. Que tiendan a favorecer el restablecimiento de las poblaciones de elementos de la flora y fauna nativas, proporcionándoles un hábitat y alimento.
7. Con el tiempo los conglomerados de estas plantas pueden llegar a facilitar de forma natural el reciclaje de nutrientes, preservándose la fertilidad, y en general acercándose gradualmente a la manera como funcionan las comunidades naturales.

Existen en México miles de especies leñosas nativas potencialmente valiosas para proceder a utilizarlas con los propósitos antes mencionados. Este primer paso consiste en inventariar los recursos vegetales disponibles potencialmente valiosos para los propósitos antes mencionados, haciendo énfasis en incrementar el conocimiento acerca de las características de las especies y su relación con sus potencialidades de uso, tales como: taxonomía, distribución geográfica, usos conocidos y conocimiento empírico y científico existente, historia de vida, hábitat y ubicación en la sucesión ecológica y otros aspectos de interés.

2.6.3. Técnica para la restauración de suelos perturbados

Su orientación principal se refiere a propiciar una aceleración artificial de la sucesión natural, considerando las siguientes observaciones (García, 1989):

1. Analizar y comprender bien de qué está compuesta la cubierta vegetal, completa de un bosque no degradado, en sus estratos herbáceo, arbustivo y arbóreo.
2. Apreciar que en el proceso de degradación van descomponiéndose y desapareciendo primero el estrato arbóreo, en segundo lugar, el estrato arbustivo, y finalmente, el estrato herbáceo, de modo que cuando desaparece éste queda el desierto de arena o piedra.
3. Poner los medios para invertir el proceso de degradación.

El proceso restaurador:

1. Elección de la especie arbustiva, con la que ha de iniciar la aceleración artificial de sucesión natural. Es el paso más importante y requiere muchas consideraciones teóricas de carácter bioclimático, edáfico, botánico, etc.
2. Estudio de hábitats en los que mejor se adapta cada especie, basado especialmente en isoyetas del período vegetativo y pisos bioclimáticos.
3. Obtención y propagación de la especie elegida en vivero forestal, desde la germinación de la semilla o la técnica de estacado hasta la obtención masiva y económica de plántulas.
4. Implantación de la especie elegida en el ecosistema a restaurar. Se realiza mediante técnicas de plantación en la zona degradada. Técnicas que deben poseer unas características mínimas:
 - a. Que sean económicas en cuanto a manejo y transporte en vivero.
 - b. Que tenga una característica para rapidez de repoblación.
 - c. Que se facilite su plantación.
 - d. Garantía de sobrevivencia de arraigo de las plantas.

2.6.4. Legislación ambiental en México con respecto a la restauración ecológica.

En México el término restauración fue definido por la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) por el artículo 3 fracción XXXIII

como el conjunto de actividades tendientes a la recuperación y restablecimiento de las condiciones que propician la evolución y continuidad de los procesos naturales. Esta definición está más bien dirigida a las acciones que permiten devolver al suelo su actividad biológica como soporte para el crecimiento de especies vegetales en un medio natural, pero no aquellos suelos que pertenecen a zonas industriales o vías de comunicación, donde, por estar limitados de estas posibilidades, se consideran suelos sin vida. De hecho, el término zonas de restauración se refiere a aquellas áreas donde se presentan procesos de degradación, desertificación, o graves desequilibrios ecológicos (LGEEPA, 1996).

Al no existir otra definición oficial en México, se ha adoptado el término restauración para referirse a la necesidad de reducir los niveles de contaminación en suelos afectados. Se han buscado otros términos del lenguaje técnico cotidiano y, entre ellos, saneamiento y limpieza parecen ser los más utilizados por ser de uso más general. Otros términos – como rehabilitación, recuperación, regeneración y tratamiento- podrían utilizarse solamente para casos específicos. En este caso, un suelo contaminado después de haber sido remediado puede ser tratado para regenerar su actividad biológica y lograr su recuperación. Lo que es una realidad es que el término remediación es cada vez más utilizado y parece ser explícito por sí mismo (SEMARNAT, 2002).

En las reformas hechas a la LGEEPA en 1997, no se aprovechó la oportunidad para dar más precisión a las definiciones, y desafortunadamente se corre el riesgo de interpretar la restauración de sitios contaminados, como una actividad meramente cosmética, más que un saneamiento o limpieza (Saval, 2004).

En base a lo anterior, el termino restaurar, se puede utilizar solo en su contexto de definición ejemplos en los cuales se utiliza este término.

Restaurar: Es el hecho de hacer crecer plantas en un sitio dañado sin haber eliminado o destruido los contaminantes previamente. Esto suena extraño, sin embargo, se hace depositando una importante capa de desechos agroindustriales y de suelo limpio encima

de derrames de petróleo o de descargas de lodos aceitosos, de tal forma que éstos quedan enterrados y encima se siembran pastos y especies vegetales de raíz corta. Cuando estas especies se desarrollan y crecen, se restablecen condiciones para la evolución de procesos naturales, a pesar de que no se haya limpiado el suelo (Saval, 2004).

Restaurar y remediar: Limpiar y demostrar que el suelo recobra su actividad biológica. Un ejemplo de este caso es cuando se logra la eliminación de contaminantes o su transformación en compuestos menos dañinos, y posteriormente se permite el crecimiento y proliferación de especies vegetales y/o animales. Esto se aplica a suelos y cuerpos que antes de ser contaminados cumplían con una función biológica (Saval, 2004).

La restauración de un suelo viene después de su remediación, cuando los niveles de contaminantes permiten el desarrollo de especies vegetales propias del lugar. En cuerpos de agua, se depositan especies acuáticas propias de la región, las cuales también cumplen la función de indicadores, cuando se observa el restablecimiento de los procesos naturales, se puede comprobar la restauración de un sitio.

Actualmente la restauración en México ha recobrado gran importancia, debido a que México es un país megadiverso y su diversidad ecológica está cada vez orillándose a situaciones críticas de equilibrio; las investigaciones son actualmente en todos los ecosistemas, atacando principalmente la erosión, contaminación en ríos y lagunas.

Cuadro 12. Restauración ecológica realizada en México

Proyectos y estudios de restauración ambiental realizados en 2002-2005.	Autor (es)
Evaluación de estrategias y prácticas de buen manejo para minimizar el efecto contaminante de las descargas camaronícolas.	Martínez Córdova, Luis Rafael
Proyecto. rehabilitación de ecosistemas de zonas áridas por el método "luchaf"	Chávez Franco, Luciano
Inventario y caracterización de las descargas que afectan la salud de ecosistemas del delta del río Colorado, México.	García Hernández, Jaqueline
Degradación de la materia orgánica en ecosistemas forestales de montaña de México.	García Calderón, Norma Eugenia
Distribución y estructura de los ecosistemas de manglar en el noroeste de México y selección de áreas con potencial para restauración y manejo.	Ruiz Luna, Arturo
Definición de grupos funcionales vegetales para la restauración del bosque Mesófilo de montaña en Chiapas.	Ramírez Marcial, Neptali
El uso de microorganismos y plantas acuáticas flotantes para la remoción de metales en aguas residuales de curtidería.	Maldonado Vega, María
Alteración de propiedades de suelos, aguas subterráneas y vegetación natural atribuibles al cambio climático.	Nikolskii Gábrilov, Iouri
Caracterización y modelación de la migración de contaminantes en la cuenca alta del río Pánuco.	Ramírez Orozco, Aldo Iván
Evaluación de riesgo ambiental por desechos mineros en el estado de Guerrero.	Torres Vera, Marco Antonio
Evaluación de la contaminación subterránea generada por el tiradero de la ciudad de Oaxaca".	Navarro Mendoza, Susana M.
Recuperación y aprovechamiento sustentable de la vegetación de zonas áridas: el caso del mezquite (<i>Prosopis</i> spp.) como alternativa de restauración de áreas degradadas en el valle del Mezquital.	Acevedo Sandoval, Otilio Arturo
Sistema costero del estado de Veracruz: fisiografía, geomorfología, riesgos y ecología de manglares y dunas costeras: implicaciones para su manejo.	López-Portillo Guzmán, Jorge Alejandro
Análisis de la diversidad de anfibios y reptiles en ambientes fraccionados de selva tropical perennifolia con el fin de establecer estrategias para su aprovechamiento sustentable como una medida de conservación de los fragmentos.	Reynoso Rosales, Víctor Hugo
Limpieza permanente de los humedales del norte de la península de Yucatán y el caribe mexicano mediante el reciclaje integral de los desechos sólidos municipales.	Maldonado López, Luis Alfonso
Diagnostico del estado de conservación del ecosistema asociado al área natural protegida playa escobilla, municipio de santa Maria Tonameca, Oax.	Méndez Méndez, Alberto
Evaluación de riesgo de suelos contamiandos con cromo, de lodos de tenerías frescos y en forma de jales adicionados a suelos erosionados	Rodríguez Vázquez, Refugio
Estructura y funcionamiento de humedales conservados y humedales invadidos por especies introducidas: diagnóstico y propuestas de manejo para el mantenimiento de los servicios ambientales como parte del ordenamiento costero.	Moreno-Casasola Barceló, Patricia
Evaluación de suelos agrícolas localizados sobre antiguos depósitos de jales, cerca del poblado Tacoaleche, Zacatecas.	Iturbide Argüelles, Rosario

Fuente: Elaboración directa

2.7. Restauración de humedales

En México, hay una diversidad de plantas acuáticas a causa de la presencia de diferentes tipos de humedales. Aunque todavía no se cuenta con un inventario completo de los humedales mexicanos, es posible tener algunas clasificaciones basadas en su origen, grado de salinidad del agua, temporalidad de la inundación, tipo de sustrato y/o en los tipos de vegetación que se presentan (Lot, 1991).

La definición de humedales manejada por Ramsar a nivel internacional plantea “los humedales son todas la extensiones de marismas, pantanos y turberas o superficies cubiertas de agua, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de 6 metros” (Mistch *et al*; 2000). Esta definición es sumamente amplia por lo que frecuentemente resulta imprecisa.

El Servicio de Pesca y Vida Silvestre de Estados Unidos propuso una definición más adecuada, sobre todo para la gestión de los humedales: son tierras en transición entre los sistemas acuáticos y terrestres donde la capa freática está habitualmente al mismo nivel o cerca de la superficie, o bien el terreno está cubierto por aguas poco profundas. Los humedales deben tener uno o más de los siguientes tres atributos: a) al menos periódicamente, el terreno ha de mantener predominantemente una vegetación de hidrófilas, b) el sustrato debe ser fundamentalmente un suelo hidromorfo no drenado, es decir, que su formación y características están determinadas por condiciones de saturación de agua de temporal o permanente y c) la presencia de una lámina de agua poco profunda o de agua subterránea próxima a la superficie del terreno, ya sea permanente o temporal. Estos componentes (hidrología, ambiente físico-suelo y vegetación) y sus interacciones (Mitsch *et al*, 2000).

También existen los humedales creados por el hombre, son el resultado de una intervención, acción única del hombre y persisten por sí mismos a partir de ese momento (Lot, 1991). Las acciones humanas pueden ser, ya sea, intencionales, tales como la

construcción de caminos que pueden represar las aguas superficiales a lo largo del camino; los humedales creados artificialmente son concebidos enteramente y deliberadamente por el hombre y subsisten tan sólo mientras ocurra una acción continua del hombre, sin el cual el sitio revertiría a condiciones originales. Un buen ejemplo de humedales artificiales son los que se encuentran en jardines, parques o en otros paisajes diseñados por el hombre. Los humedales tienen límites poco definidos; son espacio de transición, de escasa profundidad y de naturaleza cambiante. El aumento de humedad que se produce es suficiente como para afectar los procesos fisicoquímicos y biológicos del área (Moreno *et al*, 2001).

El conjunto de plantas que habitan es muy variado. Está formado por un rango de especies que va desde las acuáticas estrictas (hidrófilas) hasta las que solamente toleran un período corto de inundación. Entre éstas últimas se agrupa el mayor número de especies. Lot (1991) reconoció 90 para el estado de Veracruz, aunque este número es difícil de definir para la República Mexicana. Pertenecen a una cantidad de familias y su forma de crecimiento va desde herbáceas hasta arbóreas. Son especies que pueden encontrarse en humedales pero también en terrenos bien drenados. Ejemplo de ello son *Pluchea odorata*, *Cyperus articulatus*, *C. esculentus*, *C. lingularis*, *Eleocharis geniculata*, *E. interstincta*, *E. spathacea*, *Fuirena simplex*, *Rhynchospora colorata*, *Scirpus americanus*, *Hippomane mancinella*, *Juncos arcticus*, *J. mexicana*, *Ludwigia octovalvis*, *Platanus Rzedowski*, *Arundo donax*, *Distichlis spicata*, *Echinochloa colona*, *E. crusgalli*, *E. crusgallonis*, *Monotochloe littoralis*, *Paspalum distichum*, *Phragmites australis*, *Spartina junciformis*, *Populus mexicana*, *Salix humboltiana*, *Salix chilensis*, *Taxodium mucronatum*. Varias de ellas llegan a formar manchones densos, frecuentemente con fuerte dominancia de alguna de estas especies (Lot, 1991).

Los estados del Golfo de México y del Caribe (Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Campeche, Yucatán y Quintana Roo), se caracterizan por la abundante presencia de zonas inundables, muy ligadas a la zona costera (García, 1989).

Se registró para el estado de Veracruz, según Lot (1991) 4 familias de Pteridofitas (con 8 especies), 1 de Gimnospermas (1 especie), 20 de Monocotiledóneas (61 especies) y 42 de Dicotiledóneas (95 especies), dando un total de 165 especies. De la flora reportada, 78 corresponden a herbáceas acuáticas, 47 a herbáceas subacuáticas, 30 a los árboles, 6 a arbustos y 4 a arborescentes (palmas, bambú). De las herbáceas acuáticas, el 39% fueron enraizadas emergentes, el 18% enraizadas de hojas flotantes, 29% enraizadas sumergidas y 14% libremente flotantes. Entre las leñosas el 50% se localizaron en ambientes riparios, 40% en zonas inundadas sin corriente y el 10% en ambientes salinos y salobres. Los tipos de humedales que se manejan para México son: manglar, vegetación riparia, selva baja inundable, manzanillar, palmar inundable, sabana, matorral espinoso o inerme inundable y retenes (Moreno *et al.*, 2001).

Las comunidades herbáceas están definidas por vegetación flotante (hidrófilas de hojas flotantes) vegetación subacuática (hidrófilas emergentes) de las que destacan el popal y el tular, vegetación sumergida (hidrófilas sumergidas), marismas, vegetación halófila costera (playas) y ceibadales. Además de los tulares hay comunidades de plantas herbáceas bajas o medianas, enraizadas que frecuentemente ocupan superficies reducidas de terrenos anegados. En los lugares de clima caliente algunos de los géneros más característicos que Lot (1991) indica son *Acrostichum*, *Ammannia*, *Crinum*, *Cyperus*, *Echinodorus*, *Egletes*, *Eleocharis*, *Fimbristylis*, *Fuirena*, *Hydrocotyle*, *Hymenachne*, *Hymenocallis*, *Limnocharis*, *Ludwigia*, *Mayaca*, *Oryza*, *paspalum*, *Polygonum*, *Pontederia*, *Rhynchospora*, *Scirpus*, *Scleria*, *Spilanthes*, *Xanthosoma*, *Xyris*, *Zizania*. Entre los 1000 y 2500 m de altitud es donde se presenta mayor diversidad de comunidades de este tipo. Unos cuantos géneros de estas regiones son *Agrostis*, *Berula*, *Bidens*, *Cyperus*, *Echinochloa*, *Eleocharis*, *Equisetum*, *Helenium*, *Hydrocotyle*, *Isoetes*, *Jaegeria*, *Juncos*, *Lilaza*, *Ludwigia*, *Mimulus*, *Polygonum*, *Ranunculus*, *Rorippa*, *Sagittaria*, *Samolus*, *Spilanthes* (Rzedowski, 1978). Algunas de las especies de estas comunidades tienen tolerancia al contenido elevado de sales en el agua. Entre las más notables están las pertenecientes a géneros como *Bacopa*, *Batis*, *Borrchia*, *Cleome*,

Cyperus, Echinochloa, Euphorbia, Fimbristylis, Juncos, Leptochloa, Petunia, Polypogon y Sporobolus (Moreno *et al*; 2001).

Muchas de las diferencias entre los distintos humedales se basan en características del hidroperíodo. Esto afecta de manera importante la composición de especies, la estructura del suelo, los procesos metabólicos y frecuentemente abre el ecosistema entradas y salidas laterales de materiales (Brinson, *et al.*, 1981). El hidroperíodo es el patrón estacional desnivel del agua en un humedal y se define por su duración (tiempo que permanece la inundación), frecuencia (el número de veces que se inunda en un tiempo dado), profundidad y época de inundación. Por tanto puede decirse que viene a ser la firma de cada humedal (Mitsch *et al*; 2000).

La vida en un ambiente inundado requiere de diversas adaptaciones. *Son dos los factores ambientales que actúan como filtros seleccionando las especies que son capaces de sobrevivir en los humedales: la salinidad y la inundación (tiempo y cantidad).* La inundación resulta en substratos saturados o en largos períodos de inundación que los vuelven ambientes anaerobios. La inundación o saturación de agua altera la estructura y funcionamiento del suelo (Blom y Voeselek, 1996):

Hay una restricción del intercambio gaseoso (disminución de O₂ y acumulación de gases como N₂, CO₂, CH₄ y H₂). La saturación conlleva problemáticas particulares como es el bajo nivel de oxígeno que las plantas pueden tolerar. El oxígeno se difunde aproximadamente cuatro veces más lentamente en el agua que en el aire. Esta reducción de O₂, se da a las pocas horas de que se produce la inundación (Moreno *et al*; 2001).

Se producen efectos térmicos. Sobrevienen modificaciones a la estructura del suelo (las partículas de mayor tamaño se rompen y las nuevas partículas más pequeñas forman una estructura más densa creando poros de menor diámetro, con un incremento en la plasticidad del suelo, se hinchan los coloides, etc.), bajo estas condiciones hay mayor

resistencia mecánica a la penetración de raíces y menor concentración de oxígeno (Casado y Montes, 1995).

Hay una reducción de los nitratos a nitrógeno o iones de amonio, seguido por la reducción del manganeso y de los óxidos férricos, respectivamente. Los iones reducidos que se producen son tóxicos para las plantas. Sobrevienen modificaciones en la electroquímica del suelo (en general la reducción del potencial redox e incremento en el pH), lo cual es determinante para la existencia de suelos hidromorfos y de vegetación típica de humedales (Moreno *et al.*; 2001).

Los humedales, se encuentran entre los ecosistemas sujetos a un régimen intenso de perturbaciones, simplemente por la fluctuación en el nivel de agua. En algunos de ellos como en los sistemas riparios, hay una fluctuación anual, ya que la dimensión del río es totalmente diferente en la época de lluvias que en la de secas. Sin embargo, aquellas zonas donde no es predecible (por ejemplo, los bordos más altos), son colonizadas por la vegetación no hidrófila y cuando sube el nivel del agua durante años muy lluviosos o huracanes, las plantas mueren favoreciendo la presencia de especies más tolerantes. Lo mismo sucede en épocas de sequía, ya que ésta también puede constituir un factor de perturbación que abre los espacios para la colonización. Esta misma idea se puede aplicar a todos los límites de los humedales, ya que se debe recordar que son zonas de transición, donde el límite siempre está fluctuando (Moreno *et al.*, 2001).

En el manejo de los humedales es fundamental tomar en cuenta la dinámica del sistema en el tiempo y en el espacio, pero también el régimen de perturbación. A través de miles de años, las plantas y animales características de estos ecosistemas se han adaptado a sus cambios y fluctuaciones, tanto a las que se llevan a cabo en ciclos anuales como las que se producen períodos de tiempo más largos. Forman parte del sistema, por lo que el no tomarlas en cuenta nos llevará a plantear programas equivocados de conservación y manejo. Ejemplos de esta dinámica se han estudiado para las depresiones de dunas

costeras en el estado de Veracruz (Martínez *et al.*, 1997), donde se alternan períodos de inundación y períodos de sequía.

La contaminación es hoy en día un problema grave en los humedales. Especialmente que las zonas bajas e inundables, donde se establecen los humedales costeros resultan los sitios hacia los cuales fluye finalmente todo lo que se produce en la tierra y es transportado por el agua. En este sentido, los humedales, lagunas y el mar son el basurero de nuestras sociedades actuales. Los contaminantes que se producen a través de numerosas actividades son arrastrados y enriquecen los cuerpos de agua. La eutrofización producida por estas actividades resulta en tasas de descomposición más elevadas. Sin embargo, en muchas ocasiones estos nutrientes van acompañados de otras sustancias contaminantes que tienen el efecto opuesto. Químicos tóxicos (cromo, bario y aluminio), la precipitación de partículas químicas sobre las hojas y metales pesados inhiben la colonización por microbios del material vegetal, retardando la descomposición (Webster y Benfield, 1986). La contaminación, producto de la extracción de petróleo también ha sido una causa importante de destrucción de los humedales, sobretudo en Tabasco y al sur de Veracruz (Moreno *et al.*, 2001).

Durante los últimos 25,000 años, los ecosistemas dulceacuícolas han sufrido cambios drásticos de extensión, correlacionados con el clima regional. Los futuros cambios climáticos producirán modificaciones comparables en la cantidad y distribución de agua dulce. Las predicciones sobre la precipitación y la evaporación que tendrían lugar en el futuro son inciertas, pero el consenso sobre el efecto invernadero apuntan hacia un incremento de ambas. Algunas áreas de la superficie terrestre se volverán más húmedas y otras más secas, lo cual traerá consigo cambios en la distribución de arroyos, ríos, lagos y pantanos (Carpenter *et al.*, 1992)

La interfase tierra-agua es una zona de gran actividad biogeoquímica, que se expandirá y contraerá con las fluctuaciones de abastecimiento de agua (Wetzel, 1990). Esta interfase es especialmente importante en los arroyos, cuerpos de agua, temporales y

lagos pequeños debido a la alta proporción en la tasa perímetro-volumen. Son varios los cambios que se producirían en los humedales con el cambio climático global. Se modificaría la superficie que ocupa, la profundidad de los mismos, algunos quedarían aislados y otros se unirían.

Los cambios climáticos alterarán la biomasa total, la productividad y la descomposición de especies de las zonas riparias y de los humedales en general, modificando el abastecimiento de materia orgánica y de nutrientes a los sistemas de agua dulce.

Pérez y Ortiz (1996), realizaron una primera aproximación para estimar la vulnerabilidad de una porción costera al sur del estado de Veracruz (porción inferior del río Papaloapan y las márgenes costeras del macizo volcánico de los Tuxtlas), ante las variaciones del nivel del mar, estableciendo diversas categorías en función de que tan afectados se verían. Encontraron que las áreas más vulnerables son las lagunas costeras y el manglar (34,696 ha), mientras que el tular tiene un riesgo potencial alto de ser afectado, junto con los cuerpos de agua interiores y diversos tipos de terrenos de cultivos. En contraste Yañez *et al.* (1998), plantean que los manglares tienen gran capacidad de acomodación para contender con mejor éxito la variabilidad físico – ambiental de ritmo acelerado que impone el cambio climático (Moreno *et al.*, 2001).

Existen dos tipos de restauración para humedales. La restauración pasiva, que se refiere a los humedales en los cuales los procesos naturales del humedal son capaces de retomar su condición previa al disturbio, una vez que las alteraciones producto de la presencia humana, que condujeron a la degradación, han sido eliminadas del sitio. En esta situación, el humedal no ha sido tan severamente degradado que no puede volver a las condiciones preexistentes por sí mismo. La restauración pasiva es mucho más sencilla, menos costosa y generalmente tiene una tasa de éxito mucho más alta comparada con la restauración activa (Moreno *et al.*; 2001).

La restauración activa, se aplica a los sitios que han sido perturbados tan seriamente por el hombre que se requieren las acciones del hombre, mediante técnicas de ecologías e ingeniería, para regresar al sitio a alguna situación preexistente (Middleton, 1999).

Las opciones de restauración de humedales que requieren una restauración mínima para regresar a su estado más prístino, hasta aquellos sistemas, complejamente creados, que han sido armados como una “máquina viviente”. Las metas y fines frecuentemente determinan el plan final. Los humedales restaurados o creados como hábitat de vida silvestre generalmente son más fáciles de planear, comparados con un humedal que está destinado principalmente para el tratamiento de aguas servidas, ya que requiere más ingeniería y ciencia en su diseño (Kentula, 1996).

La secuencia de pasos para la elaboración de un proyecto de restauración de humedales consta de selección del sitio, análisis hidrológico, química del agua, suelos, selección de plantas, mantenimiento y manejo. La ciencia de la restauración es relativamente joven y la vasta mayoría de los humedales restaurados y creados son sistemas jóvenes. Por lo tanto, existe una carencia generalizada de información científica sólida acerca de varios aspectos de estos humedales. La mayoría de los humedales requieren de tres a cinco años para alcanzar la madurez y el desempeño óptimo. De contar con curvas de desempeño representativas para humedales representativos, sería posible entender la naturaleza y las tasas del proceso de maduración, establecer el éxito del proyecto y determinar cómo o cuándo manipular el sistema (Kentula, 1996).

Los estudios de restauración ecológica en México, actualmente muy diversos, se evalúa, se clasifica, se diagnóstica, se realizan investigaciones con gran soporte de análisis biológico y ecológico, con el fin de comprender como funciona la comunidad o ecosistema contaminado.

2.8. Micorriza arbuscular

Las micorrizas del tipo vesículo-arbuscular absorben la misma fuente de fósforo (P) disponible en el suelo que las plantas no micorrizadas. La única diferencia reside en que las raíces micorrizadas tienen mayor acceso al P debido a la extensión de la red de micelio en el suelo y a la producción de fosfatasas que degradan y permiten utilizar P orgánico (Bago *et al.*, 2000).

Hay algún desacuerdo acerca si son micorrizas arbusculares o si son micorrizas vesículo-arbusculares (VAM). Este último es el más apropiado para estas asociaciones, debido a que algunos hongos no producen vesículas y los arbuscúlos no siempre están presentes en las raíces micorrizadas. Las VAM, son hongos de tipo haustorio, se generan en el interior de las células corticales y su función es contribuir al incremento de la capacidad de explotación y absorción de nutrimentos por ambos participantes de la simbiosis (Brundrett *et al.*, 1996).

En el arbuscúlo se lleva a cabo la descomposición de los gránulos de polifosfato (Cooper, 1984). Constan de hifas, esporas y cuerpos auxiliares producidos en el suelo, arbuscúlos y vesículas en las raíces (Figura 10 y 11).



Figura 10. Ejemplo de Arbuscúlos, Brundrett *et al.*, (1996)

Las vesículas, almacenan reservas (gránulos de polifosfato) para el crecimiento y para situaciones de limitación energética, tanto del hongo como de la planta. Tanto

arbúsculos como vesículas son originados por el micelio intra e intercelular, cuya característica es trastocar los gránulos de polifosfato a los sitios de demanda de P. La mayor transferencia de P del hongo a la planta ocurre en aquellas células de la raíz que contienen arbúsculos (Sieverding, 1991).

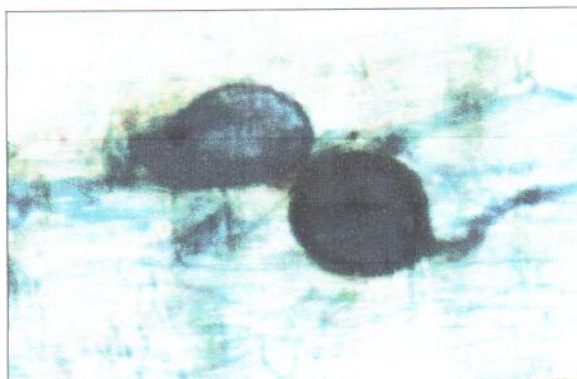


Figura 11. Vesículas con hifas Brundrett *et al.*, (1996)

La actividad del micelio coadyuva en la función de la raíz, sobre todo, cuando están agotados los nutrimentos en la zona del suelo adyacente a la raíz (Alarcón y Ferrera – Cerrato, 1999). Dado que los géneros *Gigaspora* y *Scutellispora*, no forman vesículas, los hongos que participan en las asociaciones micorrícicas vesícula arbuscular se denominan hongos micorrícicos arbusculares (HMA) (Brundrett *et al.*, 1996).

La micorriza vesícula arbuscular es la más abundante en el 90% de las plantas superiores, específicamente con las plantas herbáceas como avena, maíz, tomate, cebolla, fresa, leguminosas y pastos, y algunos árboles como manzano, cítricos, aguacate y café (Ferrera-Cerrato y Pérez, 1995).

2.8.1. Efectos de la micorriza arbuscular en las plantas

La micorrización incrementa el grado de crecimiento de las plantas, al favorecer una mayor absorción de nutrimentos (P y Zn), agua, incrementa la salinidad y longevidad de las raíces, confiere mayor tolerancia a sequía, altas temperaturas del suelo, toxicidad por metales pesados, a pH extremo y el estrés al transplante (Castellano y Molina, 1989),

citado por (Ferrera-Cerrato y Pérez, 1995). Aunque se puede aplicarse en campo, el mejor efecto se obtiene cuando se aplica a las plantas desde la fase de vivero (Alarcón y Ferrera – Cerrato, 1999).

En condiciones del trópico húmedo, el pH ácido del suelo disminuye la adsorción de fosfatos orgánicos sobre la superficie y las hifas pueden tener estrecho contacto con el mantillo (Granados *et al.*, 2001). Algunas teorías indican que la micorriza transporta el P a la planta vía corriente citoplasmática a través de cuerpos metacromáticos, los cuales parecen ser gránulos de polifosfato (González, 1998). Granados *et al.* (2001) menciona que las endomicorizas no acumulan P ya que una vez estando en la hifa, atraviesa en un flujo bastante continuo al área de intercambio (arbúsculo) y es cedido a la planta huésped.

Las endomicorizas pertenecen al orden de los Glomales, la de gran interés para su estudio es la Endogonaceae (Ferrera-Cerrato, 1993, Gerdemann y Trappe, 1974), los géneros son *Glomus*, *Gigaspora*, *Acaulospora*, *Sclerocystis*, *Entrophospora* y *Scutellospora*. Son 147 especies actualmente (Ferrera-Cerrato, 1993).

Cuadro 13. Géneros pertenecientes al orden Glomales

Género	Número de especies
<i>Acaulospora</i>	28
<i>Entrophospora</i>	3
<i>Gigaspora</i>	7
<i>Glomus</i>	73
<i>Sclerocystis</i>	13
<i>Scutellospora</i>	23
Total	147

Fuente: Tisdall y Oades; 1979

En la rizósfera, los macroagregados son formados rápidamente mediante el crecimiento y desarrollo de las raíces, estabilizados principalmente por las hifas, debido a que la

longitud y a la producción de polisacáridos de las hifas, dan estabilidad a los agregados (Tisdall y Oades, 1979).

Incrementos del volumen de suelo rizosférico alrededor de 200 cm^3 por centímetro de raíz infectada puede ser una excepción, pero de 12 a 15 cm^3 por centímetro infectado es comúnmente observada (Sieverding, 1991).

La infección micorrícica aparentemente no está influenciada por el pH y la textura del suelo (Baber, 1995). Pero en la absorción de fosfatos cambia el pH, tanto en el citoplasma como en el medio que rodea al hongo, en el citoplasma el pH es más básico mientras que el medio se vuelve más ácido (Griffin, 1994). Baber (1995) señala que la infección micorrícica, aparentemente, no está influenciada por el pH y la textura del suelo.

De acuerdo con Hernández (1991) el efecto más importante que producen las micorrizas en las plantas es un incremento en la absorción de nutrientes minerales del suelo, que se traduce en mayor crecimiento y desarrollo de las mismas. Resultados experimentales han demostrado que la hifa externa de Simbiosis de hongos micorrícicos arbusculares (HMA) puede absorber 80% de P, 25% de N, 10% de K, 25% Zn y 60% de Cu que constituye a la planta (Marschner y Dell, 1994; Crowley y Rengel, 1999):

a) Nitrógeno: Los hongos micorrícicos arbusculares absorben más amonio que nitratos (Read *et al.*, 1989).

b) Fósforo: Las micorrizas son más abundantes en suelos pobres en P asimilable (Gerdemann, 1968), ya que las plantas deficientes incrementan su pérdida de azúcares y aminoácidos de las raíces. Debido a lo anterior es más importante la deficiencia de P en la planta que la presencia o ausencia del elemento en el suelo, debido a que el P se puede encontrar en grandes proporciones en formas no asimilables (Azcon y Ocampo, 1984).

El incremento en la absorción de P por plantas micorrizadas puede deberse a mayor exploración física del suelo, mayor movimiento de P dentro de la hifa, incremento en su

almacenamiento, y su eficiente utilización dentro de la planta (Bolan, 1991). Se conoce que los iones fosfato son absorbidos por la planta a un ritmo superior al desplazamiento de éstos en el suelo, lo que origina una zona de agotamiento en las proximidades de los pelos radicales, por su parte las micorrizas amplían la zona de absorción más allá de la zona de agotamiento (Fuentes, 1999).

El P en el hongo está presente en forma de ortofosfato y es transportado activamente en la hifa como gránulos de polifosfato (Sieverding, 1991). En suelos calcáreos la mayor producción de CO₂ de raíces micorrizadas incrementan la solubilidad de los fosfatos de Ca y aumentan la absorción de P, en relación con las no micorrizadas (Knight *et al.*, 1989).

El aporte de P por los HMA incrementa la capacidad fotosintética de la planta y el uso de fotoasimilados (Alarcón *et al.*, 1998). El contenido interno de P en la planta regula la infección de HMA, cuando existen altos niveles de P reducen la permeabilidad de la membrana celular de las raíces evitando una liberación de carbohidratos (azúcares); por lo tanto, los HMA pueden sufrir una inhibición de fotosintatos de la planta (Graham, 1985).

c) Potasio: Sieverding y Toro (1998), encontraron que el K se encuentra en altas concentraciones en plantas micorrizadas en comparación con las plantas no micorrizadas. Mientras que Marschner (2002) observó resultados opuestos, atribuyéndolo a una reducción de la superficie de la raíz y por lo tanto menor absorción de K. Normalmente la adsorción de K es acompañada con una secreción equivalente de H⁺ o Na⁺, lo cual conduce a una descripción del sistema como un mecanismo de transporte contrario, además el K estimula grandemente la absorción de iones divalentes e inhibe la de los arsenatos (Griffin, 1994).

d) Calcio, magnesio y azufre: El transporte en el hongo de los cationes divalentes como Mg²⁺, Ca²⁺ y Mn⁺ son absorbidos por un sistema de transporte simultáneamente con la

absorción de fosfatos (Griffin, 1994). Para el Mg, experimentos directos demuestran que la asimilación y transporte en la hifa es pobre (Marschner y Dell, 1994). Sin embargo, Sieverding (1991) menciona que el Mg se encuentra a menudo en concentraciones más altas en las plantas micorrizadas.

Aunque se ha demostrado a través de isótopos radioactivos que la hifa transporta Ca y S, el bajo contenido de Ca en plantas micorrizadas se ha relacionado con cambios en la morfología y diferenciación de la raíz, específicamente por aumento en la suberización y lignificación del endodermo (Marschner, 2002).

e) Micronutrientes: Como Zn, Cu, S, B y Mo son activamente absorbidos por hifas y micorrizas y transportados a la planta hospedante. La absorción de Zn y Cu, es 2 o 3 veces mayor respecto a las plantas no micorrizadas, debido a que el Zn es traslocado con los gránulos de polifosfato (Kothari *et al.*, 1991).

Los elementos potencialmente tóxicos pueden ser acumulados en altas concentraciones en las plantas y llegar a ser tóxicos. Estos metales potencialmente tóxicos pueden derivarse de excesos de absorción de Zn, Cu, Fe y Co, así como de otros elementos o iones no esenciales, como Pb, Cd, Ni, Ti, Ba. Se han observado efectos de las micorrizas en el incremento de la acumulación de Cu, Ni, Pb y Zn en el pasto *Erhantia calycina*, especialmente en suelos de pH bajo (Smith y Read, 1997).

2.8.2. Manejo de las micorrizas para la revegetación en ambientes perturbados

La revegetación del suelo perturbado, debería ser dirigida a restablecer un ecosistema estable con una completa función del ciclo de nutrientes. Los hongos micorrícicos son importantes para ayudar a la realización de este objetivo, incrementando la adsorción de nutrientes por las plantas y contribuyendo a la restauración de la estructura del suelo (Millar y Jastrow, 1991).

Sin embargo, la población de hongos micorrícicos son a menudo reducidos en suelos que van a ser revegetados, debido en particular a la ausencia de las plantas huéspedes y a la perturbación de suelo (Jasper *et al.*, 1987).

El 80% de especies de plantas en ecosistemas naturales, forman asociaciones micorrícicas (Brundett, 1991). De ahí la importancia de la estrategia de maximizar la inoculación y eficiencia de hongos micorrícicos en el suelo para la revegetación. A continuación se presenta un protocolo para el manejo de los hongos micorrícicos para la revegetación:

1. Determinar la importancia de los hongos micorrícicos para el éxito de la revegetación.
2. Evaluar el grado de inoculación y efectividad de los hongos micorrícicos en el suelo que va a ser revegetado.
3. Cada evaluación o curso de acción requiere de un nivel de conocimiento científico el cual en mucho de los casos no ha sido alcanzado.
4. Los hongos micorrícicos son probablemente los más importantes para la revegetación de ecosistemas donde la proporción de plantas que son capaces para formar micorrizas es muy elevada y las deficiencias de nutrientes son una importante limitación para el crecimiento de las plantas.

Los hongos micorrícicos pueden hacer una importante contribución para el éxito de la revegetación a través de los siguientes mecanismos indicados a continuación:

1. Mejorar el establecimiento y crecimiento de las plantas micorrizadas a través del incremento de nutrientes.
2. Mantener la diversidad aumentando la habilidad de las plantas micorrizadas para competir por los nutrientes.
3. Contribuir a la eficiencia del ciclo de nutrientes y así a una estabilidad del suelo a largo plazo.
4. Estabilizar el suelo.

Mejorar el establecimiento y crecimiento de las plantas micorrícicas a través del incremento de nutrientes: Una gran cantidad de plantas nativas en los ecosistemas están

ahora determinadas como capaces de formar una asociación micorrícica con diferentes niveles de nutrientes encontrados en suelos sembrados (Brundrett, 1991).

Las micorrizas mejoran el crecimiento y supervivencia de las especies el cual pueden ayudar al establecimiento de diversos ecosistemas, un importante criterio para el éxito de la revegetación (Warcup y Mcfee, 1983).

Fitter (1985), encontró que la carencia de demostraciones claras de los beneficios de las micorrizas en condiciones de campo, facilitan las interconexiones con las plantas, aún cuando la fauna pasta y acorta vida de las raíces; indica que en suelos perturbados va a ser regenerado por la actividad de la fauna del suelo y las interconexiones con las plantas será inicialmente bajo. Mas adelante, si la inoculación llega a ser factible, solo los hongos efectivos serán utilizados. Por lo tanto, la presencia de hongos probablemente será de mayor beneficio en suelo perturbado. Una limitación frecuente para cuantificar este beneficio en experimentos de inoculación es la carencia de técnicas para inocular grandes áreas, lo cual impide el establecimiento de parcelas de suficiente tamaño para acomodar la gran variabilidad del crecimiento de las plantas en un suelo perturbado (Alvarez *et al*; 2004).

En sitios de mayor limitación para el éxito de la revegetación podría ser climática o por factores del suelo; los cuales invalidan cualquier respuesta potencial del incremento de nutrientes asimilados por las micorrizas. Los hongos micorrícicos podrían aliviar en cierto grado el efecto de las limitaciones tales como la baja humedad del suelo (Sieverding, 1991) o la toxicidad química del suelo, mediante el mejoramiento del estatus nutricional. De cualquier forma, los beneficios podrían ser pequeños si tales limitaciones de crecimiento no nutricionales son severas. Para predecir el potencial de los hongos micorrícicos para aliviar las limitaciones del crecimiento de las plantas; las asociación micorrícica de las plantas usadas en la revegetación debe ser conocida.

Frecuentemente, este conocimiento es limitado y podría ser reservado a generalizaciones de estudios de especies relacionadas en otros ambientes. El entendimiento de la asociación micorrícica con las plantas en ecosistemas particulares y la biología de los hongos que los forman, es un área importante de futuras investigaciones.

El mantenimiento de la diversidad mediante el incremento de la habilidad de las plantas micorrizadas para competir por los recursos: la diversidad de las especies de plantas en un ecosistema depende del acceso de esas plantas a los nutrientes suficientes para continuar creciendo y reproduciéndose. Las especies de plantas no micorrícicas tienen varias adaptaciones para mejorar la asimilación de nutrientes, tales como raíces ramificadas o muchas raíces largas como cabellos (Jasper, 1994). Plantas las cuales son normalmente micorrícicas estarán en desventaja competitiva en la revegetación si el fósforo es una limitante y si hay pocos hongos micorrícicos efectivos en el suelo. Por lo tanto, la presencia de hongos micorrícicos probablemente son esenciales en un ecosistema perturbado al ser restablecido (Jasper, 1994).

Gange *et al.* (1990) usando un suelo con fungicida fue capaz de demostrar que reduciendo la infectividad de los hongos micorrícicos se redujo la abundancia de cobertura y la diversidad de especies. Los ecosistemas recreados deben ser estables y mantener la diversidad de especies indefinidamente. Por lo tanto, los estudios de los beneficios de las micorrizas para revegetación son requeridos los cuales se extienden por periodos de tiempos largos, hasta que una comunidad estable de plantas es establecida.

Ciclo de nutrientes: la estabilidad de largo plazo de la revegetación de un ecosistema depende de una adecuada cantidad de nutrientes la cual se mantiene con continuas aplicaciones de fertilizante. La disponibilidad de los nutrientes podría ser alta al tiempo del establecimiento de la revegetación debido a la mineralización en el suelo perturbado y a aplicaciones de fertilizante, pero podría rápidamente convertirse en menos viable, por ejemplo mediante la adsorción del fósforo en los suelos (Barrow, 1975) o por lixiviación del suelo arenoso (Diggle y Bell, 1984).

Mejoramiento de la estructura del suelo: La perturbación física del suelo tal como la ocurrida durante la minería es probable un daño severo de la estructura del suelo. La restauración de una estructura estable del suelo en la revegetación es importante en resistir la erosión y porque es un factor importante en la productividad del suelo, influenciando todos los procesos físicos, químicos y biológicos (Millar y Jastrow, 1991). Una rápida estabilización de la estructura del suelo después de la perturbación es más probable que sea alcanzado por un crecimiento extensivo de las raíces de plantas micorrícicas porque estas raíces y sus hifas asociadas pueden actuar para unir granos de arena o microagregados del suelo (Tisdall, 1991).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Medio físico y geográfico

3.1.1 Localización geográfica

El presente trabajo se realizó en el pantano de Santa Alejandrina, municipio de Minatitlán, Ver, que se encuentra localizado entre las coordenadas extremas del meridiano 94° 07' al 94° 33' de longitud oeste y del paralelo 17° 07' al 17° 59' de latitud norte. Su altitud promedio es de 64 m.s.n.m. Tiene una superficie de 4,123.91 km² que representa el 5.66% del total del estado, lo cual lo ubica como el municipio con mayor extensión territorial. Limita al norte con los municipios de Coatzacoalcos, Ixhuatlán del Sureste y Moloacán, al sur con Hidalgotitlán (INEGI, 1997).

El municipio de Minatitlán colinda al norte con los municipios de Cosoleacaque, Ixhuatlán del Sureste, Moloacán y las Choapas; al este con las Choapas y el estado de Chiapas; al sur con los estados de Chiapas y Oaxaca, y el municipio de Hidalgotitlán, y al oeste con Hidalgotitlán, Jáltipan y Cosoleacaque (INEGI, 1997).

En Minatitlán, Ver., se localiza la Refinería General Lázaro Cardenas de PEMEX la cual se ubica al norte del municipio, las comunidades que colindan con la Refinería son Nuevo Atoyac, Aquiles Serdán, Plan de Limones y Santa Alejandrina, se encuentra a una altitud de 20 m.s.n.m.; ubicada a lo largo del río Coatzacoalcos al igual que la Refinería (Figura 12). El área de estudio, se ubica en las coordenada geográficas de 94° 29'28'', 94°20'14'' longitud oeste y 18° 00'40'', 17° 52'19'' latitud norte.

La Refinería Lázaro Cárdenas fue fundada en 1906 fue la primera a nivel nacional. Después de la expropiación petrolera, recibió el nombre actual. Forma parte del conjunto de las seis refinerías del país. En la refinería se realiza la mayor producción de la petroquímica básica de México como: gasolina, turbosina, combustolio y gas licuado. La

importancia de la cuenca baja, formada por las plantas Morelos, Cangrejera, Cosoleacaque y Pajaritos, es tal, que allí se genera el 98% de la petroquímica utilizada en el país. La Cangrejera, con sus trescientas sesenta ha, es la planta de tratamiento de hidrocarburos más grande de Latinoamérica (ILSE, 2000).



Figura 12. Ubicación geográfica de las Refinerías-PEMEX en México.
(PEMEX, 2004).

Los complejos petroquímicos en el país están distribuidos de la siguiente manera: Azcapotzalco, Distrito Federal; Cactus, Chiapas; Cadereyta, Nuevo León; Camargo, Chihuahua; Cangrejera, Escolín, Matapionche, Minatitlán, Pajaritos, Poza Rica, Cosoleacaque, Veracruz; Cd. Madero, Reynosa, Tamaulipas; Cd. Pemex, Nuevo Pemex, Tabasco; Salamanca, Guanajuato; Salina Cruz, Oaxaca; San Martín Texmelucan, Puebla y Tula, Hidalgo.

México, es el cuarto productor de petróleo en el mundo, con producción diaria de 3 millones de barriles, exportando 1.4 millones de barriles diarios. Este producto se exporta a Canadá, Estados Unidos, Centroamérica, España, Francia, Yugoslavia, Japón e Israel (Ayllon y Chavez, 1994).

En México, la industria petrolera en su conjunto ha tenido un impacto negativo en materia ambiental. Por la amplia gama de productos derivados del petróleo, no ha sido posible evaluar cuantitativamente la contaminación involucrada desde la fase de explotación hasta la obtención de los petroquímicos básicos (Saval, 1995).

Evidentemente, debido a los derrames ocasionales de petróleo o sus derivados, en las aguas del río Coatzacoalcos muchas especies no logran sobrevivir ni reproducirse. Para recuperar el equilibrio del medio ambiente, la industria, privada y pública, productora de hidrocarburos ha realizado inversiones millonarias en el tratamiento de aguas, el ahorro de energía, la disminución del humo y el reciclaje de desechos químicos (ILSE, 2000).

La producción de petróleo y elaboración de productos petrolíferos y petroquímicos en la Refinería Lázaro Cárdenas desde 1980 hasta el 2002, fue en promedio de 311 mil ton/año, aunque ha tenido una disminución del 2000 al 2002.

Durante mucho tiempo y hasta hace poco, nadie se preocupaba por el destino de los residuos generados, dando por hecho que la naturaleza limpiaba el ambiente, pero fue cambiando por la composición de los residuos, aumento en cantidad y complejidad, esta capacidad (degradativa y amortiguadora) empezó a alterarse.

En México se ha realizado poca investigación sobre este último, en comparación al aire y agua referente a estudios de contaminación, por lo que es necesario llevar a cabo estudios para conocer el estado actual de los suelos cercanos a zonas industriales y urbanas, indispensables para el uso adecuado y conservación de éstos.

Cuadro 14. Indicadores del subsector petrolero en Minatitlán

Periodo	Producción (miles de toneladas)
1980	493.0
1981	508.0
1982	415.0
1983	353.0
1984	269.0
1985	328.0
1986	316.2
1987	421.8
1988	374.4
1989	417.6
1990	467.6
1991	453.7
1992	501.3
1993	337.9
1994	383.7
1995	311.9
1996	297.1
1997	156.8
1998	125.5
1999	149.0
2000	30.4
2001	28.6
2002	18.7

Fuente: Secretaría de Energía

Los residuos generados por las actividades de la refinería como son: catalizadores gastados y lodos aceitosos, por citar algunos, son depositados en tambores, patios y fosas rústicas, previo a su tratamiento y disposición final en sitios autorizados. Existe el interés por parte de PEMEX de rehabilitar los suelos contaminados. De acuerdo a la información de PEMEX, dos de los lugares más contaminados por hidrocarburos a nivel nacional son la refinería "Lázaro Cárdenas" y el Pantano de Santa Alejandrina, ambos ubicados en el sureste de México (Veracruz y Tabasco) (González y Quintero, 1995).

Por otra parte, se tiene que los residuos o desechos de la actividad petrolera están clasificados como residuos peligrosos. Se calcula que en 1991 se generaron 5,292 miles de ton/año de residuos peligrosos y se ha estimado que el 24% son derivados del petróleo, es decir, 130,183 ton/año. Un informe de la SEDESOL menciona que los residuos anuales de los procesos de refinación y petroquímicos de Petróleos Mexicanos, alcanzan la cifra de 1.7 millones de ton de residuos, de estos el 90.15% corresponde a

desperdicios semisólidos; 9.6% a líquidos y 0.25% a sólidos; 18% del total se consideran peligrosos. Los residuos reciclados representan 0.1% y se estima que sólo 13% del total es susceptible de ser reutilizado (Saval, 1995).

Cuadro 15. Residuos de la Refinación y Petroquímica (PEMEX)

RESIDUOS	10 ³ T/año	%
Desperdicios semisólidos	1,532.55	90.15
Desperdicios líquidos	163.2	9.6
Desperdicios sólidos	4.25	0.25
Residuos peligrosos	221.0	18.0
Residuos reciclados	1.7	0.1
Residuos susceptibles de ser utilizados	187.0	13.0

Fuente: Saval 1995

La caracterización del sitio se realizó siguiendo la metodología propuesta en la norma oficial mexicana de emergencia NOM-EM-138-ECOL-2002, que consiste en estudios de campo del sitio, muestreo y caracterización del sitio, selección del equipo de muestreo apropiado, selección del recipiente apropiado y conservación de las muestras, número de muestras, identificación de las muestras, registro de la información del muestreo.



Figura 13. Panorámica del pantano y la refinería Lázaro Cárdenas.



Figura 14. Descarga de la refinería al pantano de Santa Alejandrina

3.1.2 Hidrografía

El municipio está irrigado por una abundante red de corrientes fluviales, en las que destacan los ríos Uxpanapa, Nanchintal y Coachapan. Cuenta con algunos arroyos y lagunas tributarios del Río Coatzacoalcos (INEGI, 1997).

3.1.3 Clima

Su clima es ecuatorial, con una temperatura media anual de 26.1°C, con lluvias abundantes en verano y principios de otoño, con menor intensidad en invierno. Su precipitación media anual es de 2,041 mm (INEGI, 1997).

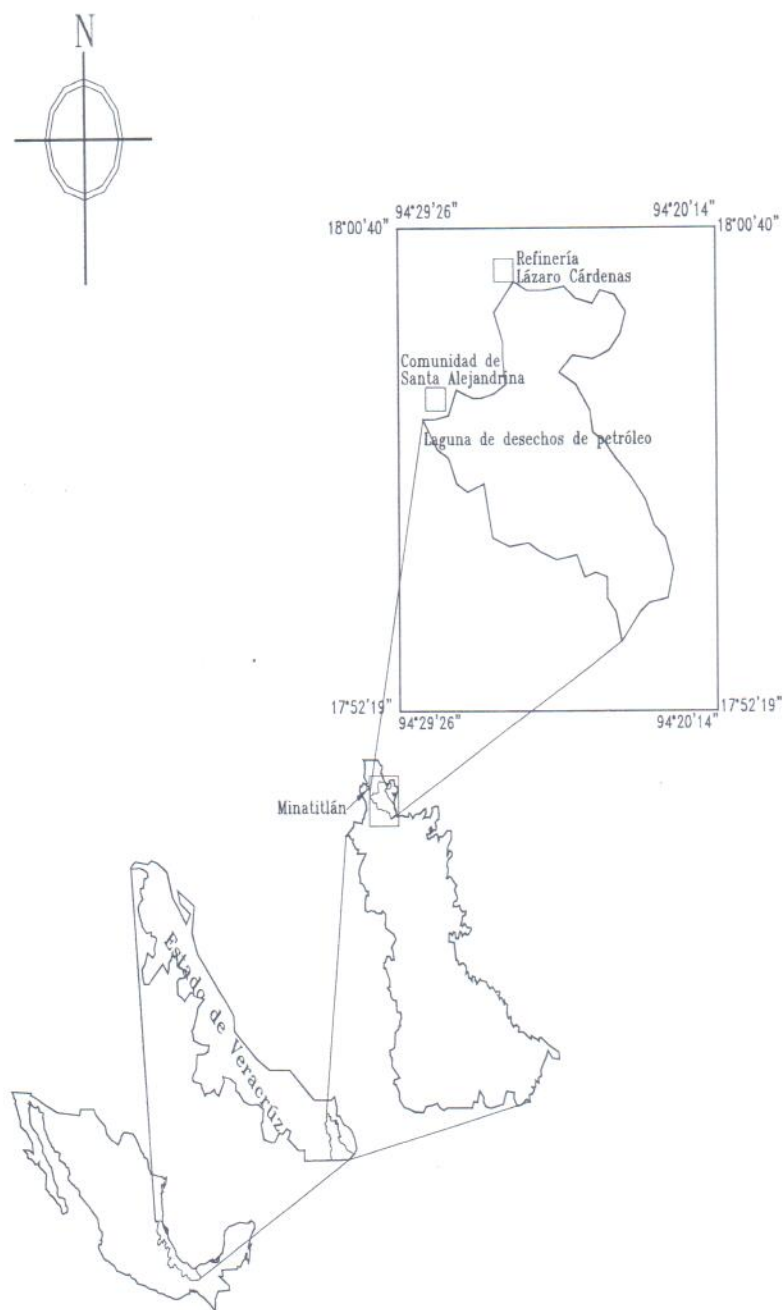


Figura 15. Localización del área de estudio

Sus bosques están dominados por árboles altos de más de 30 m, con abundantes bejucos y plantas epifitas, que permanecen verdes todo el año. En las áreas bajas los árboles más abundantes son los de caoba, ramón, amate y huapaque; en esta zona existen en forma exclusiva y silvestre el barbasco, usado como materia prima en la industria farmacéutica (INEGI, 1997).

3.1.4 Orografía

El municipio se encuentra ubicado en la zona ístmica del Estado; la mayor parte de su suelo es de extensas llanuras. La mayoría de los terrenos presentan pendientes algo pronunciadas que dificultan el empleo de maquinaria en la agricultura y ganadería. A lo largo del Río Coatzacoalcos los suelos tienen una consistencia arcillo-arenosa, a 30 m se han establecido casas construidas con materiales preferentemente de madera con techos de palma, aunque también existen casas construidas con ladrillos y block.

3.1.5 Flora

Los ecosistemas que coexisten en el municipio son Bosque Tropical Perennifolio estuvo dominado por árboles altos de más de 30 m, con abundantes bejucos y plantas epifitas, que permanecían verdes todo el año. En las áreas bajas los árboles más importantes fueron la Caoba (*Swetenia macrophylla* King.), Ramón (*Brosimum alicastrum* Sw.), Amate (*Ficus glabrata* H.B.K.) y huapaque (*Dialium guianense* (Aubl.) Sand); en esta zona existe en forma endémica y silvestre el barbasco (*Dioscorea composita* Hemsl.), usado como materia prima en la industria farmacéutica. Actualmente la flora dominante del municipio son praderas y pastizales, los árboles se encuentran en menor proporción y se emplean principalmente como postes vivos o para sombra (Gobierno del Estado de Veracruz, 1988).

Actualmente la vegetación se ha clasificado para el municipio de Minatitlán como Selva Mediana, Selva Baja y Vegetación Riparia, encontrándose en las partes bajas caoba y

amate. A lo largo del río Coatzacoalcos se encuentran áreas marcadas con lirio acuático (*Eichhornia crassipes*).

3.1.6 Fauna

El municipio contaba con una variedad de animales silvestres como el conejo (*Sylvilagus* sp.), liebre (*Lepus* sp.), venado (*Odocoileus virginianus* Hays), entre otros, que hoy día se encuentran en cantidades muy reducidas por una sobreexplotación del recurso fauna y porque se han transformado sus hábitats en tierras de uso ganadero.

3.1.7 Agricultura y Ganadería

Fue a partir de 1984 y 1985 cuando la ganadería empezó a constituirse como una actividad económica más importante, lo que demuestra que la actividad ganadera es reciente en la región; pues anterior a estos años, la agricultura y sobretodo la siembra de arroz era la actividad más importante.

Se encontró una ganadería cuya alimentación se basa en el pastoreo de pastos nativos (gramas) e introducidas (estrella) principalmente. Predominó el sistema de doble propósito; la escasez de forraje en época de sequía y en invierno debido al mal manejo de las praderas por el desconocimiento de otras alternativas forrajeras y técnicas de conservación de forrajes, nulo aprovechamiento de leguminosas y grandes potreros (Maldonado, 1997).

3.2. Metodología

Se usaron diferentes metodologías para diferentes niveles y localidades estudiadas durante el desarrollo de la investigación; que consistieron en análisis de fertilidad del sustrato, agua del Río Coatzacoalcos y de la principal salida de agua de la Refinería Lázaro Cárdenas, análisis microbiológico y estudio ecológico. Para cada estudio se realizó análisis estadístico correspondiente.

Debido a que la superficie del humedal de Santa Alejandrina abarca aproximadamente 100 ha y no hay información cartográfica, se decidió elegir asociaciones vegetales ubicadas en base a los cambios de vegetación y de acceso ya que hay áreas inaccesibles dentro del pantano.

3.2.1. Definición del tamaño del área de muestreo

Para definir el área de muestreo se eligió el método del Cuadrado Mínimo, mencionado por Braun-Blanquet., (1979) y Müller Dumbois y Ellenberg. (1974); proponen que después de haberse identificado la composición vegetal en una superficie extensa se determina posteriormente una superficie menor, en la cual 80% de las especies esté presente en esta área y se realiza estadísticamente una curva que relacione las especies y el área de distribución. El cual consiste en marcar un punto fijo en medio metro cuadrado, contando el número de especies que entran en el muestreo, con esta información se realiza una gráfica sigmoide en la que conforme se aumenta la superficie muestreada la curva de la gráfica se vuelva una asíntota, es decir no varíe la curva. Para este estudio el área mínima cuadrada fue de 4 m², es decir de 2x2 m; en campo se marcó la superficie mínima cuadrada con estacas amarradas con una cuerda para formar los cuadros. Aleatoriamente se muestrearon 8 cuadros por cada asociación con un total de 40 sitios.

Inicialmente, se pretendió quedaran fijos los sitios de muestreo, pero debido a que en algunas asociaciones vegetales está inundado, o bien, pastan los animales, es imposible mantener sitios fijos. La elección del área de muestreo en cada asociación la definió principalmente la accesibilidad al lugar, ya que aún en la época de sequía el humedal tiene áreas muy someras.

La información ecológica que se tomó por sitio fue: **Especie:** Se realizó una colecta botánica; **Altura:** Se midió con un flexómetro; **Cobertura:** Se midió diámetro 1 y diámetro 2 en forma de cruz por cada especie, **Profundidad del suelo:** Se midió con flexómetro solo la cantidad de materia orgánica que se acumula en el suelo contaminado

por petróleo; **Presencia y ausencia de las especies en cada cuadro:** Se obtuvo a partir de la elaboración de matrices binarias que indiquen la presencia o ausencia de las especies. Posteriormente se utilizó el programa PC-ORD para la creación de dendrogramas.

3.2.2. Colecta botánica e identificación taxonómica

La colecta botánica del área de estudio se llevó a la secadora del Herbario de la División de Ciencias Forestales, después se procedió a su identificación taxonómica, con apoyo del Herbario Nacional de la UNAM, Herbario de la UAM Iztapalapa, Herbario de Preparatoria Agrícola, Herbario del Departamento de Zootecnia, Herbario de la División de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH). Los ejemplares que tenían flor y/o fruto, raíz, hojas se encuentran depositadas en los anteriores herbarios.

3.2.3. Análisis Ecológico

Se realizó una clasificación de la vegetación considerando su altura, distribución en el área de estudio y su diversidad. Se definieron cinco tipos de asociaciones vegetales a partir de la condición del sustrato, altura de la vegetación y especies dominantes:

- A.- Ciperáceas hasta 50 cm de altura
- B.- Ciperáceas asociadas con gramíneas
- C.- Ciperáceas asociadas con plantas rastreras y otras especies
- D.- Ciperáceas con tulares y carrizal
- E.- Árboles

Para el muestreo se utilizaron estacas de madera, etiquetas de aluminio con la identificación del sitio y asociación muestreadas, cordón de plástico de una pulgada de grosor para cercar los sitios; papel periódico y dos prensas botánicas.

La colecta botánica se realizó cortando plantas con flor y/o fruto, se colocaron en papel periódico, numerándolas con número progresivo y se prensaron, durante la estancia en Minatitlán, se estuvo cambiando el periódico para evitar contaminación por hongos.

3.2.3.1. Clasificación de formas de vida adaptada a humedales

Teniendo el listado de las plantas identificadas y/o validadas por los expertos en taxonomía. Se procedió a determinar su forma biológica según Raunkier (1905) y modificado en (1918). Se utilizó la Clave para los Grupos y Subgrupos de Formas de Vida de Tejero (1980); fue modificado para este estudio en las claves de referencia y en la clasificación para las plantas acuáticas, en el apartado de Hemicriptofitas acuáticas.

En base a la información que se obtuvo de cada asociación se generó un esquema de la vegetación dibujados por su distribución a lo largo del humedal, denominado para este estudio como pantano.

La clasificación modificada de formas de vida que se utilizó para este estudio fue la siguiente:

Fanerofitas: Normalmente con tallos y ramas leñosas.

1. Árboles pequeños (Microfanerofitos de 2 a 5 m).mFanerofitos
2. Árboles grandes (Mesofanerofitos de 5 a 50 m).....MesoFanerofitos
3. Arbustos de tamaño normal
(Nanofanerofitos menos de 2 m).....Nanofanerofitos

Hemicriptofitas: Los restos de las yemas se ocultan relativamente durante la estación desfavorable extendidas sobre la superficie del suelo siendo después protegidos por las reminiscencias de los tallos muertos; durante el desarrollo de la estación favorable las yemas de renuevo se activan y sobresalen siempre arriba de la superficie del tallo perenne; los hemicriptofitos son típicamente herbáceos, pero los tallos maduros pueden mostrar algunos espesamientos secundarios (lignificados), particularmente cuando permanecen reminiscencias mientras la planta va muriendo.

Hemicriptofitas (hierbas).....Hemicriptofitas
Hemicriptofitas reptantes (rastreras o enredaderas).....Hrept
Hemicriptofitos cespitosos.....Hcaesp
(Amacollados o arreglados los tallos circularmente, pastos)

Hemicriptofitas acuáticas (hydrofitos).....	hyd
Hydrofitos enraizados de hojas flotantes.....	hyd-enraiz-flot
(<i>Nymphaea</i> spp.)	
Hydrofitos enraizado emergente.....	hyd-enraizados-emergente
(<i>Typha</i> spp., <i>Pontederia</i> spp.)	
Hydrofitos enraizados sumergidos.....	hyd-enraiz-sumerg
(<i>Hydrilla</i> spp.)	
Hydrofitos enraizados de tallos postrados.....	hyd-enraiz-tallos
(<i>Pontederia</i> spp.)	
Hydrofitos errantes.....	hyd-errantes
(<i>Eichhornia</i> spp., <i>Lemna</i> spp)	

3.2.3.2. Análisis estadístico

A) Determinación de clusters

Con el listado taxonómico de las plantas del estudio, se realizó una matriz binaria transpuesta de presencia - ausencia de las plantas encontradas en los sitios y en las asociaciones (Figura 16), Para obtener dendrogramas o cluster, se utilizó el Programa PC-ORD versión 4 (Mc Cune y Mefford, 1999), el cual consiste en un análisis multivariado de datos ecológicos por medio de un cluster basado en una media de distancia del índice de Jaccard y una unión del promedio entre grupos (Matteucci y Colma, 1982).

	PLANTA 1	2	3	4...
Asociación	1	0	1	0...
o sitios de	0	1	0	1...
muestreo	0	0	0	0...
	1	1	1	0...

Figura 16. Diseño de matriz binaria presencia- ausencia

B) ANOVA

Para evaluar la calidad de vida en cada asociación se realizó con las variables especie, altura y cobertura un análisis de varianza para bloques completamente al azar con 5 tratamientos y 8 repeticiones con 95% confiabilidad, mediante el programa SAS System.

Obtenida la información de las especies, se comparó una relación entre los análisis de varianza en la relación a las estrategias y especies de colonización de las plantas con respecto al sustrato, con la referencia de los análisis ecológicos, análisis químico del

sustrato, análisis del agua y análisis microbiológico con la finalidad de tener una caracterización completa del pantano de Santa Alejandrina, Minatitlán, Ver.

Respaldado este modelo con los análisis microbiológicos, se determinó por consecuencia a las especies nativas que invaden el pantano de Santa Alejandrina, Minatitlán, Ver. como plantas fitorremediadoras, tolerantes, restrictivas y competitivas.

3.2.3.3. Cálculo de indicadores ecológicos.

Para el cálculo del índice de Shannon – Wiener, se utilizó la siguiente fórmula:

$$H = \sum_{i=1}^s - (P_i) (\log_2 P_i) \dots\dots\dots(1)$$

Donde:

H = Contenido de información de la muestra (bits/individuo) = Índice de diversidad.

S = Número de especies

Pi = Ni/N.

Para el cálculo de Valor de Importancia (Mueller-Dombois y Ellenberg) se indica a continuación:

Valor de Importancia (V. I)= Densidad Relativa + Dominancia Relativa + Frecuencia Relativa

Donde:

Densidad relativa = (Número de individuos de la especie / Número total de individuos) * 100

Dominancia Relativa =(Dominancia de la especie/Dominancia de todas las especies)*100

Frecuencia relativa= (Frecuencia de la especie / Frecuencia de todas las especies)*100

3.2.4. Análisis químico de sustrato de hidrocarburos y agua

Para la colecta del sustrato contaminado se utilizaron palas rectas, estimando que el peso del sustrato fuera de dos kg; en total 45 muestras, con la excepción de la asociación número 4, en la que solo se tomaron tres muestras de sustrato debido a la dificultad de la colecta.

Las muestras de sustrato fueron separadas de la materia orgánica; se depositaron en bolsas de plástico identificándolas con etiquetas que contenían la información del

número de sitio y de asociación; por último colocadas en costales de rafia. Se llevaron directamente al laboratorio después de la colecta.

Las muestras del sustrato de cada sitio por asociación se extendieron sobre papel periódico con una profundidad de 1 cm de espesor, fueron secadas al sol. Posteriormente el sustrato se separo en trozos más pequeños para cernirlo con un tamiz No. 10 (dos mm de diámetro) de acero inoxidable. Este grado de fineza es para la mayoría de los análisis requeridos con el propósito de diagnosticar la fertilidad de un suelo.

3.2.4.1. Metodologías para la determinación del análisis químico

Según la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudios, muestreos y análisis. Se realizó un análisis de suelos para determinar: materia orgánica, nitrógeno inorgánico, fósforo asimilable, potasio intercambiable, textura, hierro, cobre, zinc, manganeso, sodio, calcio, magnesio, carbonatos, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, boro, conductividad eléctrica, pH, capacidad de intercambio catiónico (ver Cuadro 16).



Figura 17. Determinación del Nitrógeno inorgánico (método volumétrico)

Para esta investigación, se considera como sustrato al los desechos de hidrocarburo depositados por la refinería al pantano y que han cubierto el suelo original para las

asociaciones 1,2 y 3. En las asociaciones 4 y 5 el hidrocarburo se ha integrado al suelo, mezclándose con el suelo arcillo-arenoso existente en la zona.

Para el muestreo del agua, se tomaron dos litros del afluente principal de la Refinería “Lázaro Cárdenas” y del río Coatzacoalcos (Figura 18).

El análisis químico del agua fue inmediatamente llegando al laboratorio, mediante el procedimiento de Absorción Atómica. Las determinaciones que se realizaron fueron: magnesio (Mn), sodio (Na), cobre (Cu), fierro (Fe), manganeso (Mg) y zinc (Zn) (Cuadro 16).

Cuadro 16. Método para el análisis químico del sustrato contaminado por hidrocarburos

VARIABLE	MÉTODO	MÉTODO DE CUANTIFICACIÓN	REFERENCIA	NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-EM-138-ECOL-2002
pH	Relación suelo: agua (1:2)	Potenciómetro	Bates (1981).	AS-02
Conductividad eléctrica (CE)	Agua: suelo 2:1	Conductímetro	Richards, 1954.	AS-18
Materia Orgánica (MO)	Combustión húmeda	Walkey y Black	Walkey (1947) y Black (1934).	AS-07
Nitrógeno inorgánico	Extracción con KCL 1N destilación por arrastre de vapor	Volumetría/ micro-Kjeldahl	Kjeldahl, citado por Bremmer (1965)	AS-08
Fósforo (P)	Bray I y Olsen	Colometría y Fotocolometría	Olsen <i>et al</i> (1954) y Bray y Kurtz, 1945).	AS-10 AS-11
Potasio intercambiable (K)	Acetato de Amonio (AcNH_4^+)	Flamometría	Chapman (1965).	AS-12
Calcio (Ca)	AcNH_4^+	Volumetría	Chapman (1965).	AS-12
Magnesio (Mg)	AcNH_4^+	Volumetría	Chapman (1965).	AS-12
Hierro (Fe)	DTPA 1:4	Absorción atómica	Merha y Jackson (1960)	AS-37
Manganeso (Mn)	DTPA 1:4	Absorción atómica	Merha y Jackson (1960)	AS-37
Zinc (Zn)	DTPA 1:4	Absorción atómica	Merha y Jackson (1960)	AS-14
Cobre (Cu)	DTPA 1:4	Absorción atómica	Merha y Jackson (1960)	AS-14

Fuente: Elaboración directa

3.2.4.2. Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza en bloques completamente al azar con la información obtenida por asociación y por sitio y comparación de medias (Tukey). El análisis de varianza de los resultados se efectuó con el programa estadístico Statistical Analysis System (SAS) versión 8.0 para Windows.



Figura 18. Canal de desagüe al pantano de Santa Alejandrina

Se determinó la correlación de materia orgánica (MO), pH y conductividad eléctrica (CE), ya que son los indicadores que más inciden directamente sobre los cambios químicos del suelo.

3.2.5. Análisis microbiológico

Se colectó una planta con raíz por sitio, en total 45 muestras, debido a que se tuvo la excepción de la asociación número 4, en la que solo se tomaron tres muestras de plantas, debido a la dificultad de la colecta. Las plantas fueron separadas de las bolsas y preparadas para el análisis microbiológico.

3.2.5.1. Peso seco de la raíz

Las plantas fueron registradas en el laboratorio y sin maltratar la raíz se retiró el exceso de sustrato contaminado con agua de la llave para obtener la totalidad de estas, después se dio el último enjuague con agua destilada, se secó con papel absorbente para determinar peso fresco y volumen radical. Una parte de la raíz se secó en la estufa y por una relación con el peso total fresco de la raíz se obtuvo el peso seco de la raíz.

3.2.5.2. Determinación de la actividad microbiana del sustrato contaminado

Se realizó la determinación de la actividad microbiana (producción de CO_2), la cual consistió en el método volumétrico. Se colocaron 30 gr de suelo por duplicado en frascos, en este caso se utilizó el sustrato contaminado cernido, se agregó agua destilada hasta llevarlo a capacidad de campo. Se colocó un frasco en blanco, consiste en frascos sin muestras de sustrato y/o suelo, también por duplicado. Posteriormente, se colocó un vaso pequeño dentro de cada frasco presionándolo para que quedara sujeto por el mismo suelo. Al vaso, se le insertó una tira pequeña de papel filtro doblada en forma de acordeón y se le agregó 5 ml de solución 0.5 molar de NaOH. Los frascos se incubaron 5 días a 28°C .

Para cuantificar el CO_2 producido en los frascos sin sustrato (blanco) y con sustrato, se vació el contenido del vaso en un matraz, incluyendo el pedazo de papel filtro. El interior del vasito se enjuagó tres veces con agua destilada, vaciando ésta en el matríz. Después se agregó agua destilada al matraz hasta llegar a 50 ml. A cada matraz se le agregaron 2 ml de BaCl_2 al 2% y 3 gotas de fenolftaleína al 1% y se tituló con HCL 0.1 N hasta que la solución pasara de color rosa a incoloro. La actividad microbiana se calculó con la ecuación siguiente:

$$\text{mg CO}_2 = [\text{B} - \text{P}] \text{ N} \times 22 \dots\dots\dots (1)$$

Donde: B = ml de HCl gastados en la titulación del blanco, P = ml de HCl gastados en la titulación de la muestra, N= Normalidad de HCl, 22= Constante del número de equivalentes de CO₂ que reaccionan con NaOH; es decir, el PM del CO₂ (44) se multiplica por 0.5, debido a que una molécula de NaOH reacciona sólo con la mitad de una molécula de CO₂.

3.2.5.3. Evaluación de la colonización de la micorriza arbuscular

I. Tinción de raíces

Se realizó conforme a la metodología de Phillips y Hayman (1970). La parte restante de la raíz pasaron por los procesos de aclareo, blanqueo, acidificación, tinción y decoloración, al final se colocaron en una sustancia fijadora (formaldehído, etanol y ácido acético glacial, en partes iguales) (Kormanik *et al.*, 1989).

Se realizó una modificación a la metodología hacia el aclareo de raíces, debido que raíces impregnadas por el contaminante de hidrocarburos, impide su observación al microscopio, o bien no es clara la observación para distinguir el micelio, vesículas y los arbúsculos.

Las raíces teñidas se pusieron en KOH al 10% por 5 días y la solución quedó de color café oscuro, se cambió la solución y se volvió a poner KOH al 10%, con el fin de retirar el contaminante, se observó que no afecta a la estructura de las raíces.

II. Determinación del porcentaje de colonización micorrícica Vesícula–Arbuscular en raíces

Las raíces se separaron y fueron montadas de 15 a 20 raíces en porta objetos manteniéndolas húmedas con lactoglicerol con un tamaño aproximado de un centímetro. Se realizó la observación al microscopio en zig-zag, para familiarizarse con las estructuras adheridas a las raíces, posteriormente se revisaron las raíces en sentido

opuesto con el fin de tener una mayor información de las raíces en el portaobjetos. Se realizó un conteo de arbusculos, vesículas y micelio. Se aplicaron las fórmulas 2, 3 4 y 5.

Las primeras observaciones fueron para identificar los gránulos de contaminantes adheridos aún a la raíz, hongos patógenos y separarlos de las observaciones de las micorrizas. La revisión fue en zig-zag; es decir se inició en la parte superior izquierda del portaobjetos después se recorrió hacia la parte inferior, continuo con la siguiente raíz repitiendo el procedimiento anterior.

Se realizó un conteo de hifas, vesículas y arbusculos. Después se determinó el porcentaje de colonización endomicorrícica, porcentaje de arbusculos y porcentaje de vesículas (Phillips y Hayman, 1970). Se aplicaron las siguientes fórmulas:

$$\text{PORCENTAJE DE COLONIZACIÓN} = \frac{\text{NÚM. DE SEGMENTOS COLONIZADOS}}{\text{NÚM. DE SEGMENTOS TOTALES}} \times 100 \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{PORCENTAJE DE COLONIZACIÓN TOTAL} = \left[\frac{\text{NÚM. DE SEGMENTOS COLONIZADOS}}{\text{NÚM. DE SEGMENTOS TOTALES}} \right] \times 100 \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{PORCENTAJE DE COLONIZACIÓN POR VESÍCULAS} = \left[\frac{\text{NÚM. DE SEGMENTOS CON VESICULAS}}{\text{NÚM. DE SEGMENTOS TOTALES}} \right] \times 100 \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{PORCENTAJE DE COLONIZACIÓN POR ARBÚSCULOS} = \left[\frac{\text{NÚM. DE SEGMENTOS CON ARBÚSCULOS}}{\text{NÚM. DE SEGMENTOS TOTALES}} \right] \times 100 \dots\dots\dots (5)$$

III. Conteo de esporas

Debido a que las micorrizas V-A, pertenecen al orden Glomales, que producen esporas en el suelo. Las especies de hongos endomicorrízicos V-A sólo pueden identificarse por

medio de estas estructuras o esporocarpos. En este estudio se utilizó el método de tamizado y decantación de Gerdemann y Nicolson, (1963) (citado por Ferrera – Cerrato, 1993).

Este es un método práctico, muy utilizado en estos estudios (Ferrera – Cerrato, 1993) se obtienen porcentajes de esporas adecuados, pero en el momento de la separación frecuentemente quedan partículas de suelo, ácaros y basura; además que no se facilita la caracterización de las esporas presentes, es decir el tipo de esporas que se presentan.

Consiste en hacer una suspensión con 100 gr de suelo y 2000 ml de agua, se pasa por tamices de 500 y 44 micras y se hacen lavados con agua. En el último tamiz, se coloca un papel filtro cuadriculado con 0.5 cm previamente, para facilitar la cuantificación. Se revisan las muestras en un microscopio estereoscópico. La lectura se realizó de izquierda a derecha y de derecha a izquierda. Las primeras observaciones fueron para distinguir las formas de las esporas de la basura y de las partículas de hidrocarburos que abundaban. Después se procedió a su conteo, revisando que realmente fueran esporas y no huevecillos de ácaros, ácaros u otro tipo de partículas. El resultado se obtiene en el número de esporas en 100 gr de suelo.

$$\frac{\text{NÚM. DE ESPORAS EN 100 gr SUELO SECO}}{\text{NÚM. DE ESPORAS CONTADAS gr. DE SUELO SECO}} \times \frac{100 \text{ gr DE SUELO HÚMEDO}}{100 \text{ gr DE SUELO HÚMEDO}} \dots\dots\dots (6)$$

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Análisis Ecológico

4.1.1. Dinámica del humedal contaminado por hidrocarburos

Está definida en dos períodos durante el año, la estación de sequía (invierno- primavera) en la cual tiene acceso en algunas áreas, ya que el suelo no tiene consistencia debido a que se inunda constantemente. En la época de lluvias en su totalidad es inaccesible (verano- otoño).

A) Estación de sequía (invierno-primavera)

En esta época en el humedal baja el nivel freático, aunque los hydrofitos enraizados emergentes (acuáticas enraizadas emergentes) como la especie *Thypa domingensis*, *Thalia genticulata* L. y *Eliocharis cf yacorensis* E. Roalson, permanecen sumergidos y perennes; el acceso al humedal se facilita, *Pontederia sagittata* C. Presl., se encuentra a las orillas del humedal, así como en el sustrato contaminado expuesto al sol. Los hydrofitos enraizados de hojas flotantes (acuáticas enraizadas y flotantes), como las especies de *Nymphaceae* spp., sus hojas se secan conforme el nivel del agua baja, formando una alfombra seca de materia orgánica sobre el hidrocarburo, esto permite que las semillas de las especies colonizadoras o ruderales tengan el sustrato adecuado para su germinación, permitiendo que emerjan los hemicriptofitos cespitosos (pastos) y la sucesión ecológica terrestre inicie inmediatamente después de la zona inundable, la familia predominante es de las Ciperáceas. También se presentan especies de la familia Gramineae, Verbenaceae y Zosteraceae (Figura 19).



Figura 19. Nenúfares secos cubriendo al hidrocarburo.

Después de que el nivel freático baja del humedal. A la derecha germinación de ciperácea.

Después que las Ciperáceas son las dominantes, los nanofanerofitos (arbustos menores de 2 m), las hemicriptofitas (hierbas) y hemicriptofitos reptantes (rastreras) inician su invasión. El sustrato de la materia orgánica favorece a las familias Leguminosae, Malvaceae, Piperaceae, Solanaceae, Asteraceae, Alismataceae, Boraginaceae, Heliconiaceae, Onagraceae, Polygonaceae, Verbenaceae, Vitaceae, Convolvulaceae y Umbelliferae, se puedan establecer sean más heterogéneas y sus formas biológicas también provean mayor biodiversidad al humedal. Cyperus no es la especie dominante con su gran número de especies, pero aún continúa persistiendo.



Figura 20. Hidrocarburos de desecho cubiertos por nenúfares. Sirven como sustrato orgánico, por encima pastos colonizadores.

Los mesofanerofitos (árboles de 5-50 m.), su existencia se encuentra a las orillas del humedal, en forma de acordonamiento, la presencia de carrizos o pastos largos, así como de nanofanerofitos, es la última área en la cual el sustrato se ha ido modificando y a simple vista no se observa el hidrocarburo, se entremezcla con arenas arcillosas del suelo natural que colinda con el humedal, esto favorece que este último estrato sea diferenciado.

A1) Presencia del fuego

Cuando el hidrocarburo es expuesto al sol, debido a que el nivel freático baja en el humedal, o bien en las partes altas fue depositado, por sus características aceitosas y de un color negro, permite que la temperatura que oscila de 27° a 35° C en Minatitlán, favorezca que se incendie (Figura 21).



Figura 21. Desechos de hidrocarburos incendiándose.

A causa de la temperatura ambiente en el pantano de Santa Alejandrina, Minatitlán, Ver.

Cuando el hidrocarburo se incendia lentamente, es decir se desarrolla sin llama y arde lentamente a lo largo de la superficie espesa, se le llama de combustión completa; debido a que solo fueron depositados los desechos y en algunas ocasiones extendidos a lo largo de la superficie; estos incendios causan nubes de humo que disminuyen la visibilidad. La combustión libera carbono en forma de CO₂ y de carbono inorgánico que se precipita en el sustrato calcinado de hidrocarburos, al igual que los metales pesados como el fierro (Fe) y el cobre (Cu). Con las altas temperaturas que permanecen cuando

se presenta el incendio por el contaminante de hidrocarburos, tiende a incrementar la evaporación. Generalmente, cuando el hidrocarburo se incendia, hay pérdidas de vegetación por el fuego, a pesar de las pérdidas obvias durante la quema, hay aumentos de materia orgánica en las capas de suelo mineral, al irse agregando los residuos de los vegetales carbonizados.

Al final de la combustión el desecho de hidrocarburos aceitosos queda calcinado en forma de trozos y marcadas grietas, las cuales favorecen la retención de la humedad y del agua, lo cual se convierten en micrositios adecuados para la germinación de semillas, principalmente de plantas invasoras que generan grandes cantidades de semillas, o bien, su reproducción es a través de rizomas.

Además que los análisis de suelos indican que el contenido de nitrógeno inorgánico es muy alto después del incendio al igual que la actividad microbiana, es un factor predominante para el establecimiento de las plantas.

El incendio favorece la acidez del suelo, la cual va disminuyendo hasta llegar al nivel salino, característica de las selvas.

B) En la época de lluvias (verano- otoño)

En la época de lluvias el nivel freático aumenta, la vegetación que se desarrolla en la época de sequía queda cubierta por agua e inicia la revegetación acuática, prevaleciendo por los hydrofitos enraizados de hojas flotantes (acuáticas enraizadas y flotantes), predominando la familia Nymphaeaceae con dos especies dominantes *Nimphaea elegans* y *Nimphaea fallax*. El hidroperíodo es anual en el pantano de Santa Alejandrina.

En el caso de los hydrofitos errantes (acuáticas no enraizadas), la familia Lemnaceae prevalece perenne dentro del humedal, su población disminuye en la época de sequía y en la época de lluvias tiende a crecer más su población; *Eichhornia crassipes*, domina en la boquilla de salida del ducto que conecta a la Refinería Lázaro Cárdenas con el

pantano, aunque el nivel freático disminuya no queda seco. Los hydrofitos enraizados emergentes (acuáticas enraizadas emergentes) de las familias Cyperaceae, Pontederiaceae y Typhaceae, sobreviven durante las dos estaciones del humedal. Los hydrofitos enraizados sumergidos son perennes, la especie que prevalece es la *Hidrilla verticillata*.

4.1.2. Listas preliminares florísticas del pantano de Santa Alejandrina.

Se realizaron dos colectas botánicas en dos años consecutivos, las fechas de colecta coincidieron en la segunda quincena del mes de marzo.

En la primera salida, se realizó un recorrido por el pantano, se identificaron los cambios de vegetación en los estratos sucesionales dentro del pantano, basados principalmente por su altura, la accesibilidad se determinó por la distribución, frecuencia y por el tiempo en que fueron depositados los desechos de hidrocarburos. Es decir, cuando se realizó un depósito reciente de desechos al pantano, el desecho es pastoso, de coloración negra, aceitoso, consistente pero no solidificado, después de que se incendia por las altas temperaturas que predominan en el lugar, además que aumenta internamente su propia temperatura, favorece que se incendie con el tipo de combustión lenta, se carboniza y se agrieta, comienza a solidificarse y se forma una capa, Sin embargo, continúa sin consistencia a partir de los 25 - 30 cm de profundidad. Al agrietarse, permite que el desecho aceitoso de hidrocarburos florezca a la superficie y se incendie nuevamente por las altas temperaturas que oscila en el interior del residuo.

En el caso de los desechos aceitosos de hidrocarburos que fueron extendidos después de depositarlos, el grosor del contaminante con respecto al suelo natural, permite que la carbonización se solidifique y se convierta en sustrato, el cual las especies acuáticas sirven como materia orgánica en la época de sequía.

Sin embargo, la pendiente natural que tiene el humedal para captar agua, no favorece la deposición del residuo, ya que la consistencia del residuo en el agua, forma una

extensión imposible de acceder; llega a incendiarse, las emisiones de gases son mayores debido a la humedad que se libera, pero no logra tener una consistencia sólida.

Las emisiones que se realizaron en años anteriores 3-5 años, tienen características diferentes, la vegetación se ha establecido (asociación 1 y 2), el sustrato aún es de color negro, es aceitoso y se incendia en algunas áreas, aún cuando la vegetación está invadiendo, el pasto que es predominante se quema y rebrota.

El contaminante que tiene más de 5 años después de ser depositado en el pantano y fue colocado en el área que se inunda una vez al año, ha pasado por el proceso de carbonización y si se deposito donde el suelo predominante es de arcilla y arena, se mezcla con el desecho de hidrocarburos, observándose solo trozos cristalinos del residuo y predominando los materiales naturales del suelo; se definen 2 estratos vegetales conformados (hemicriptofitos y nanofanerofitos) y uno en proceso de establecimiento (fanerofitos). Si el residuo fue depositado en el área inundable, se incendia, pero su carbonización no permite que se solidifique. Se observan plantas agresivas estableciéndose en esta área. Hay poca actividad microbiana.

En cada uno de los cambios de vegetación, se realizó una colecta botánica, para comparar los cambios de vegetación y facilitar un muestreo ecológico en la siguiente salida.

La vegetación que predominó en la primera salida fueron las ciperáceas, localizadas en las zonas donde el contaminante se incendia con facilidad. Conforme el contaminante va perdiendo sus características originales, la vegetación va cambiando por la presencia de nanofanerofitos, solo acordonando el pantano se ubicaron los fanerofitos; en el caso de los hydrofitos solo fueron detectados como materia orgánica sobre el sustrato calcinado.

Se identificaron 23 ejemplares, las especies indicativas y de mayor abundancia en la colecta botánica fue la del género *Cyperus* spp., la especie dominante *C. odoratus* y

C.elegans; se encontraron agrupados, formando colonias sobre los desechos de hidrocarburos que tienden a incendiarse por su condición aceitosa, *Rhynchospora holosquenoides* (Rich) Herter y *Echinochloa walteri* (Pursh Heller) se asocian con las Ciperáceas; *Typha domingensis*, forma una barrera viva que limita con el suelo al descubierto; *Eragostis prolifera* (Sw) Stend, se colectó en el tramo que fue rellenado con escombros de la Refinería, con el fin de tener mejor compactación para permitir el acceso a los camiones que transportaban los desechos de hidrocarburos, este tipo de vegetación es ruderal de las orillas de los caminos.

La segunda colecta botánica se llevó a cabo al siguiente año, pero recientemente en el mes de febrero se había realizado un chapeo ya que los habitantes de Sta. Alejandrina pastorean a su ganado en el humedal cuando es época de sequías.

Cuadro 17. Listado de la primera colecta botánica en Sta. Alejandrina

Aeschinomene sensitiva Sw.	Heliotropium macrostachyum (DC) Hemsley.
Avicennia germinans (L.)L.	Ipomea trichocarpa Ell.
Bonamia cf. sulphurea Brand.	Jussiaea peruviana L.
Cyperus odoratus L.	Ludwigia octovalvis (Jacq.) Raven.
Cyperus elegans L.	Rhynchospora holoschoenoides (Rich).Herter.
Cyperus surinamensis Roth.	Sagittaria lancifolia L.
Cyperus lingularis L.	Seshania herbanea (Mill.)
Cleome spinosa Jacq.	Typha domingensis Pers.
Echinochloa walteri (Pursh Heller).	Panicum elephantipes Nees ex Trin
Eleusine indica (L.) Gaerth	Pontederia sagittata C. Presl.
Eclipta prostrata (L.)L.	Polygonum punctatum Ell.
Eragostis prolifera (Sw.) Steudel.	

La vegetación que se colectó tuvo más complicaciones ya que varios ejemplares solo tenían flor o fruto o ninguna estructura reproductiva.

Se inició la identificación taxonómica por comparación con el listado anterior, se colectaron nuevas especies de la familia de Cyperaceae, se identificaron las plantas acuáticas, principalmente los nenúfares y por observación, se identificó la especie de *Lemna* spp., para el caso de la hidrilla había un acceso para colectarla. La identificación se realizó en los herbarios de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) del

Departamento de Preparatoria Agrícola, Zootecnia y de la División de Ciencias Forestales, del Herbario Nacional de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y de la Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa (UAM) (Cuadro 19).

Se identificaron 46 especies, la familia Cyperaceae fue aún más abundante, se identificaron dos géneros *Cyperus* spp. y *Eliocharis* spp., su distribución es acuática y terrestre; los fanerofitos fueron identificados, *Citharexylum ellipticum* Sessé Moc, árbol que no tuvo resistencia a los contaminantes de hidrocarburos, la coloración de sus hojas de las yemas apicales y axilares tuvieron un cambio en su coloración de verde claro a café hasta llegar gradualmente a negro. Las ramas que aún no estaban lignificadas también tuvieron un cambio en su coloración como en las anteriores. La altura del árbol 4 m; esta misma especie se encontró a la orilla del pantano, con una altura promedio de 6 m , abundantes ramas jóvenes, coloración de las hojas verde claro, las maduras con una coloración ligera a verde oscuro.

Se identificaron las plantas acuáticas y su distribución, ya que en el caso *Pontederia sagittata* C. Presl. y *Eliocharis* cf *yacorensis* E. Roalson., resisten favorablemente la sequía y los niveles de contaminación por hidrocarburos, su distribución llega después del nivel del agua hasta 15 m del suelo seco.

Cuadro 18. Listado florístico preliminar de la segunda colecta botánica

<i>Ageratum corymbosum</i> Zuccagni.	<i>Heliconia latispatha</i> Benth.
<i>Avicennia germinans</i> (L.)L.	<i>Hidrilla verticillata</i> (Lf) Royle.
<i>Brickellia pacyensis</i> Coult.	<i>Hydrocotyle bonariensis</i> Comm. ex Lam.Xh.
<i>Cecropia obtusifolia</i> Berthold	<i>Jussiaea peruviana</i> L. (H.) Hara.
<i>Ceiba pentandra</i> L(Gaerth).	<i>Lantana hispida</i> Kunth.
<i>Cissus sycioides</i> L.	<i>Lemna</i> sp.
<i>Citharexylum hexangulare</i> Greenm.	<i>Ludwigia leptocarpa</i> (Nutt) Hara.
<i>Citharexylum ellipticum</i> Sessé Moc.	<i>Malvaviscus arboreus</i> Cav..
<i>Cyperus articulatus</i> L.	<i>Muntigia calabura</i> L.
<i>Cyperus elegans</i> L.	<i>Nymphaea elegans</i> Hooker.
<i>Cyperus giganteus</i> Vahl.	<i>Nymphaea fallax</i> Ornduff.
<i>Cyperus lingularis</i> L.	<i>Panicum elephantipes</i> Nees ext Trin
<i>Cyperus odoratus</i> L.	<i>Pontederia sagittata</i> C. Presl.
<i>Cyperus papyrus</i> L.	<i>Piper tuberculatum</i> Jacq.
<i>Cyperus surinamensis</i> Roth.	<i>Polygonum punctatum</i> Ell.

Echinochloa colonum L., Lint	Plattymicium jejunum Klitgard
Echinochloa walteri (Pursh) Heller.	Phyllospadix torreyi Watson.
Eclipta prostrata (L.)L.	Rhynchospora holoschoenoides (Rich) Herter.
Eleusine indica (L.)Gaerth	Solanum rudepanum Dunal.
Eliocharis cf yacorensis E. Roalson	Typha domingensis Pers.
Eragrostis prolifera (Sw.) Stend	Trichilia havanensis Jacq.
Eichhornia crassipes (C. Martius) Solms – Laub	Thalia genticulata L.

Después de la segunda colecta, se realizó un muestreo ecológico, determinando 5 áreas características sucesionales del pantano, definidas como asociaciones vegetales, se tomaron 8 sitios de muestreo con un tamaño de 4 m² por cada asociación, la información recabada fue: especie, altura, diámetro de copa y profundidad del suelo. En cada sitio fueron colectadas las especies vegetales que no eran aún identificadas.

4.1.3. Listado florístico del pantano de Santa Alejandrina

En el listado florístico del pantano de Sta. Alejandrina, se identificaron 30 familias con 53 especies, los cuales fueron donados a los herbarios que apoyaron a esta investigación.

Cuadro 19. Listado florístico del pantano de Sta. Alejandrina, Minatitlán, Ver por familia

Nombre científico	Familia
<i>Hydrocotyle bonariensis</i> Comm. Ex Lam	Apiaceae
<i>Sagittaria lancifolia</i> L.	Alismataceae
<i>Ageratum corymbosum</i> Zuccagni.	Asteraceae
<i>Eclipta prostrata</i> (L.) L.	Asteraceae
<i>Brickellia pacyensis</i> Coult.	Asteraceae
<i>Avicennia germinans</i> L. L.	Avicenniaceae
<i>Heliotropium macrostachyum</i> (DC) Hemsley	Boraginaceae
<i>Ceiba pentandra</i> (L.)Gaerth	Bombacaceae
<i>Cleome spinosa</i> Jacq.	Caparaceae
<i>Cecropia obtusifolia</i> Berthold	Cecropiaceae
<i>Cyperus articulatus</i> L.	Cyperaceae
<i>Cyperus papyrus</i> L.	Cyperaceae
<i>Cyperus elegans</i> L.	Cyperaceae
<i>Cyperus odoratus</i> L.	Cyperaceae
<i>Cyperus surinamensis</i> Roth.	Cyperaceae
<i>Cyperus lingularis</i> L.	Cyperaceae
<i>Cyperus giganteus</i> Vahl.	Cyperaceae
<i>Eliocharis cf yacorensis</i> E. Roalson.	Cyperaceae
<i>Rhynchospora holoschoenoides</i> (Rich) Herter.	Cyperaceae
<i>Bonamia cf.sulphurea</i> Brand.	Convolvulaceae

Cuadro 19. Continuación

Nombre científico	Familia
<i>Ipomea trichocarpa</i> Ell.	Convolvulaceae
<i>Muntingia calabura</i> L.	Elaeocarpaceae
<i>Eleusine indica</i> (L.) Gaerth	Gramineae
<i>Eragrostis prolifera</i> (Sw.) Steudel.	Gramineae
<i>Echinochloa colonum</i> L., Lint	Gramineae
<i>Echinochloa walteri</i> (Pursh) A. Heller.	Gramineae
<i>Panicum elephantipes</i> Nees ext Trin	Gramineae
<i>Hydrilla verticillata</i> (Lf) Royle.	Hydrocharitaceae
<i>Heliconia latispatha</i> Benth.	Heliconiaceae
<i>Sesbania herbacea</i> (Mill).	Leguminosae
<i>Aeschynomene sensitiva</i> Sw.	Leguminosae
<i>Plattymicium jejunum</i> Klitgard	Leguminosae
<i>Lemna</i> sp.	Lemnaceae
<i>Malvaviscus arboreus</i> Cav.	Malvaceae
<i>Thalia genticulata</i> L.	Maranthaceae
<i>Trichilia havanensis</i> Jacq.	Meliaceae
<i>Nimphaea elegans</i> Hooker	Nymphaeaceae
<i>Nimphaea fallax</i> Ornduff	Nymphaeaceae
<i>Jussiaea peruviana</i> L. (H.) Hara.	Onagraceae
<i>Ludwigia leptocarpa</i> (Nutt) Hara.	Onagraceae
<i>Ludwigia octovalvis</i> (Jacq.) Raven.	Onagraceae
<i>Piper tuberculatum</i> Jacq.	Piperaceae
<i>Polygonum punctatum</i> Ell.	Polygonaceae
<i>Phyllospadix torreyi</i> S. Watson.	Potamogetonaceae
<i>Eichhornia crassipes</i> (C. Martius) Solms-Laub.	Pontederiaceae
<i>Pontederia sagittata</i> C. Presl.	Pontederiaceae
<i>Solanum rupestris</i> Dunal.	Solanaceae
<i>Typha domingensis</i> Pers.	Typhaceae
<i>Cissus sycioides</i> L.	Vitaceae
<i>Citharexylum ellipticum</i> Sessé Moc.	Verbenaceae
<i>Citharexylum hexangulare</i> Greenm.	Verbenaceae
<i>Lantana hispida</i> Kunth	Verbenaceae
<i>Phyllospadix torreyi</i> Watson	Zosteraceae

4.1.4. Formas de vida de Raunkier adaptada al pantano

Para el estudio de las especies que habitan en el pantano de Santa Alejandrina, basándose en las formas de vida de Raunkier (1905), se realizó la clasificación de las especies vegetales modificada para las formas de vida acuáticas (Cuadro 20):

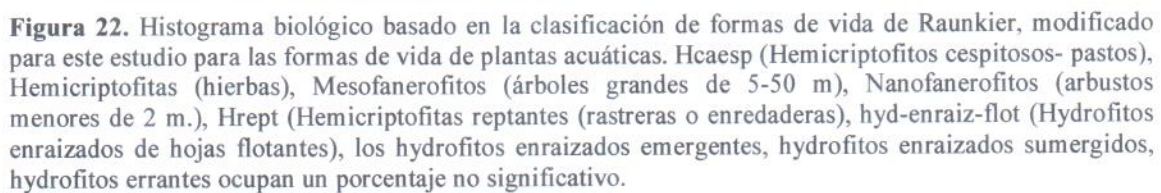
Cuadro 20. Clasificación de formas de vida del pantano de Santa Alejandrina

Mesofanerofitos (árboles de 5-50 m)	
<i>Avicennia germinans</i> (L.) L.	Avicenniaceae
<i>Ceiba pentandra</i> L. Gaerth.	Bombacaceae
<i>Cecropia obtusifolia</i> Berthold.	Cecropiaceae
<i>Muntingia calabura</i> L.	Elaeocarpaceae
<i>Plattymicium jejenum</i> Klitgard	Leguminosae
<i>Trichilia havanensis</i> Jacq.	Meliaceae
<i>Citharexylum hexangulare</i> Greenm.	Verbenaceae
Nanofanerofitos (arbustos menores de 2m)	
<i>Aeschynomene sensitiva</i> Sw.	Leguminosae
<i>Malvaviscus arboreus</i> Cav.	Malvaceae
<i>Piper tuberculatum</i> Jacq.	Piperaceae
<i>Solanum rudepanum</i> Dunal.	Solanaceae
Hemicriptofitas (hierbas)	
<i>Ageratum corymbosum</i> Zuccagni.	Asteraceae
<i>Brickellia pacyensis</i> Coult.	Asteraceae
<i>Eclipta prostrata</i> (L.) L.	Asteraceae
<i>Heliotropium macrostachyum</i> (DC) Hemsley	Boraginaceae
<i>Heliconia latispatha</i> Benth	Heliconiaceae
Hemicriptofitas (hierbas)	
<i>Sesbania herbacea</i> (Mill)	Leguminosae
<i>Jussiaea peruviana</i> L. (H.) Hara.	Onagraceae
<i>Ludwigia leptocarpa</i> (Nutt) Hara.	Onagraceae
<i>Ludwigia octovalvis</i> (Jacq.) Raven	Onagraceae
<i>Polygonum punctatum</i> Ell.	Poligonaceae
<i>Citharexylum hexangulare</i> Greenm.	Verbenaceae
<i>Cissus sycioides</i> L.	Vitaceae
Hemicriptofitos reptantes (rastreras)	
<i>Bonania cf. sulphurea</i> Brand.	Convolvulaceae
<i>Ipomea trichocarpa</i> Ell.	Convolvulaceae
<i>Hydrocotyle bonariensis</i> Lam	Apiaceae
Hemicriptofitos cespitosos (pastos)	
<i>Cyperus articulatus</i> L.	Cyperaceae
<i>Cyperus papyrus</i> L.	Cyperaceae
<i>Cyperus elegans</i> L.	Cyperaceae
<i>Cyperus odoratus</i> L.	Cyperaceae
<i>Cyperus surinamensis</i> Roth.	Cyperaceae
<i>Cyperus lingularis</i> L.	Cyperaceae
<i>Cyperus giganteus</i> Vahl.	Cyperaceae
<i>Rhynchospora holoschoenoides</i> (Rich) Herter.	Cyperaceae
<i>Eleusine indica</i> (L.) Gaerth	Gramineae
<i>Eragrostis prolifera</i> (Sw.) Steudel.	Gramineae
<i>Echinochloa colonum</i> L., Lint	Gramineae
<i>Echinochloa walteri</i> (Pursh) A. Heller.	Gramineae
<i>Panicum elephantipes</i> Nees ext Trin	Gramineae
<i>Eragrostis prolifera</i> (Sw.) Stend	Gramineae

<i>Lantana hispida</i> Kunth.	Verbenaceae
<i>Phyllospadix torreyi</i> S. Watson.	Potamogetonaceae
Hydrofitos errantes (acuáticas no enraizadas)	
<i>Lemna</i> sp.	Lemnaceae
<i>Eichhornia crassipes</i> (C. Martius) Solms-Laub.	Pontederiaceae
Hydrofitos enraizados de hojas flotantes (acuáticas enraizadas y flotantes)	
<i>Nymphaea elegans</i> Hooker.	Nymphaeaceae
<i>Nymphaea fallax</i> Ornduff	Nymphaeaceae
Hydrofitos enraizado emergente (acuáticas enraizadas emergentes)	
<i>Eliocharis cf yacorensis</i> E. Roalson	Cyperaceae
<i>Pontederia sagittata</i> C. Presl.	Pontederiaceae
<i>Sagittaria lancifolia</i> L.	Alismataceae
<i>Thalia genticulata</i> L.	Maranthaceae
<i>Typha domingensis</i> Pers.	Typhaceae
Hydrofitos enraizados sumergidos	
<i>Hydrilla verticillata</i> (Lf) Royle	Hydrocharitaceae

4.1.5. Histograma biológico conforme a la clasificación de formas de vida

El espectro biológico o histograma biológico permite ubicar a las formas de vida de la vegetación del pantano de Santa Alejandrina, de esta manera se obtiene que los hemicriptofitos y hemicriptofitos cespitosos son el estrato predominante del sistema lagunar contaminado por hidrocarburos con un porcentaje del 30% cada uno del total de la vegetación. Los mesofanerofitos, como los nanofanerofitos son dominantes debido a que se ubican en el acordonamiento del humedal contaminado. En el caso de los hydrofitos enraizados flotantes tienen una presencia continua a lo largo del humedal contaminado porque sirven como materia orgánica para las siguientes sucesiones vegetales.



4.1.6. Análisis sucesional del pantano de Santa Alejandrina, Minatitlán, Ver

En el pantano de Sta Alejandrina, la vegetación subacuática, clasificación según Moreno (2001), es denominada “El Tular”, la vegetación herbácea predominante es la *Typha*

domingensis Pers. y las especies codominantes *Sagittaria lancifolia*, *Thalia genticulata*, *Pontederia sagittata* C. Presl., *Eliocharis* cf *yacorensis* E. Roalson.

En este tipo de hidrófilas enraizadas se incluye el carrizal, se localiza en agua somera o suelo fangoso rico en materia orgánica y forman parte de esta comunidad géneros de *Cyperus* y *Eliocharis* de la familia Cyperaceae.

Entre las especies de hydrofitos errantes se encontraron *Lemna* sp. y *Eichhornia crassipes*, esta última también es abundante en el ducto que conduce los desechos de hidrocarburos con el pantano, al igual que en las orillas del Río Coatzacoalcos.

Los hydrofitos enraizados flotantes se determinaron *Nimphaea elegans* y *Nimphaea fallax*, estas especies tienen un papel importante en la dinámica sucesional del ecosistema acuático del pantano ya que es la principal materia orgánica que provee al pantano contaminado para el establecimiento de los hemicriptofitos.

En el área marginal del pantano de Sta. Alejandrina, Minatitlán, Ver., según indica Van Dobben (1967), citado por (Grime, 1982), en el tema de ruderales de pantano; en los pantanos quedan expuestas a la colonización áreas considerables de fango y lodo que quedan al descubierto cuando el nivel del agua disminuye durante los periodos secos. Esos sustratos son generalmente húmedos y ricos en nutrientes disponibles, y a menudo favorecen el extremadamente rápido crecimiento de las plantas, no es una sorpresa encontrarse que las especies viven en los pantanos alterados son anuales con una alta tasa potencial de crecimiento y en favorables condiciones son generalmente capaces de producir un elevado número de semillas; muchas de ellas tienden a enterrarse en el suelo y quedan en el sustrato latentes por mucho tiempo.

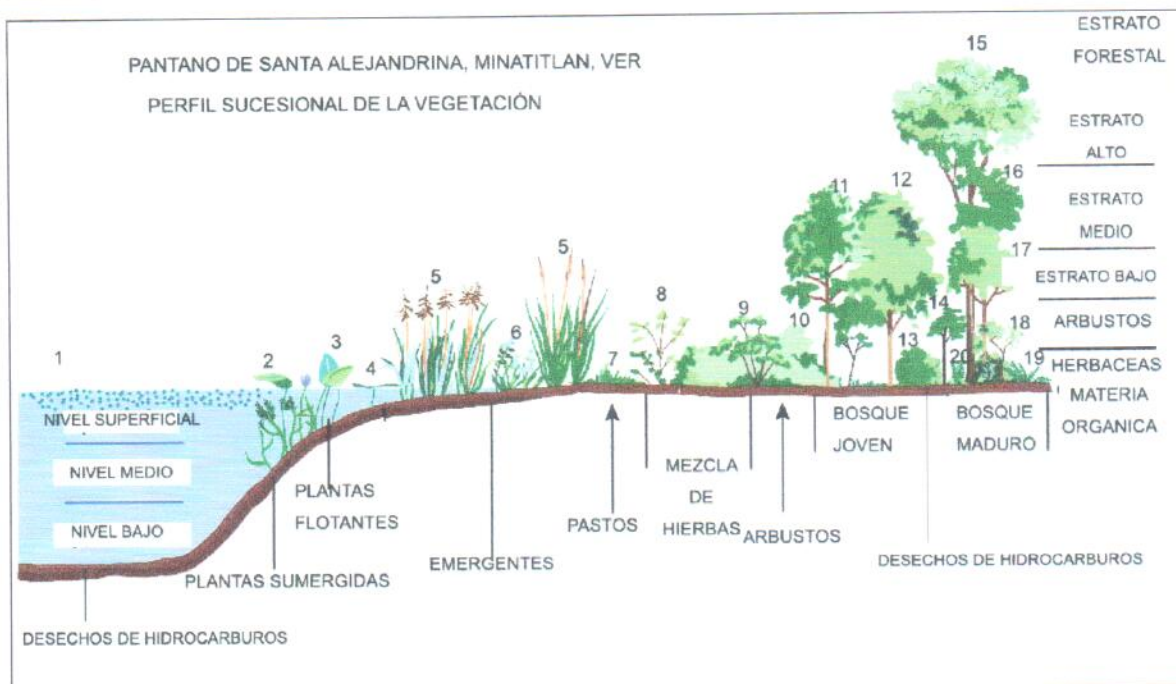


Figura 23. Perfil sucesional de la vegetación en el pantano de Santa Alejandrina, Minatitlán, Ver. 1. *Lemna* sp., 2. *Nimphaea* spp., 3. *Eichhornia crassipes*, 4. *Hidrilla verticillata*, 5. *Typha domingensis* Pers., 6. *Cyperus* spp., *Eliocharis* spp., 7 y 8. *Rhynchospora holoschoenoides* (Rich) Herter, *Eleusine indica* (L.) Gaerth, *Eragrostis prolifera* (Sw.) Stend, *Echinochloa colonum* L., *Panicum elephantipes* Nees ext Trin., *Echinochloa walteri* (Pursh) Heller., *Eragrostis prolifera* (Sw.) Stend 9 y 10. *Aeschynomene sensitiva* Sw., *Malvaviscos arboreus* Cav., *Solanum rudepanum* Dunal, *Panicum elephantipes*, 11 y 12. *Muntigia calabura*, 13. *Piper tuberculatum* Jacq., 14. *Cecropia obtusifolia*, 15. *Ceiba pentandra*, 16. y 17. *Muntigia calabura*, 18. *Panicum elephantipes* Nees ext Trin., 19 y 20. *Citharexylum hexangulare* Greenman, *Ageratum corymbosum* Zucc. *Pontederia sagittata* Presl, *Echinochloa walteri*. Los desechos de hidrocarburos indican que el humedal está totalmente contaminado en los tres niveles de agua que se indican (bajo, medio y superficial).

Los lodos en este estudio tienen grandes cantidades de desechos de hidrocarburos, los estudios microbiológicos indican que existe gran actividad microbiana.

Estas especies anuales, actualmente abundan con el nombre de malas hierbas o malezas, lo que parece que antes del advenimiento de la agricultura, la mayoría de las malas hierbas que acompañan a los cultivos ya habían evolucionado en hábitats sometidos a formas más naturales de perturbación. Esta conclusión está apoyada por el hecho de que muchas de las malas hierbas en los cultivos son comunes en hábitats alterados, en pantanos y en la orilla del mar (Grime, 1979).

Cuando la sucesión ha llegado a la etapa en que existe una densa cubierta vegetal (a menudo tan pronto como el segundo año que sigue a la perturbación), las condiciones ya no favorecen el establecimiento de pequeñas plántulas de crecimiento relativamente rápido, ya que la supervivencia de las especies pioneras depende en gran medida de una renovada dispersión hacia sitios recién perturbados. Esta característica, al comportamiento sucesional del pantano es importante, la forma de vida dominante fue la de las hemicriptofitas. La zona de estudio es altamente perturbada y cuando la invasión de los nanofanerofitos y mesofanerofitos se establecen, es debido a que se encuentran en la periferia del humedal.

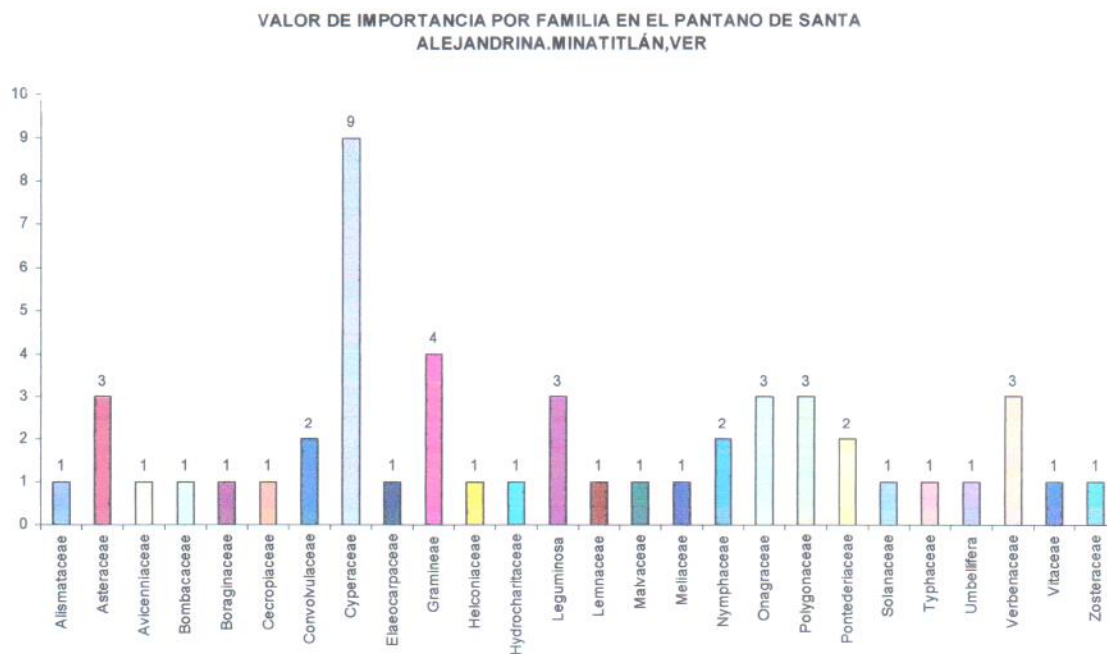


Figura 24. Valor de importancia por familia, en el pantano de Santa Alejandrina, Minatitlán, Ver.

Según estudios de Clements, (1961), Tansley, (1939), Margalef (1968), Whittaker (1975), Grime (1981), Magurran (1983), Kobayashi, *et al.* (2001), la sucesión ecológica secundaria está generalmente marcada por una disminución progresiva de los cambios en el ritmo florístico, las tasas relativamente bajas de cambios en la vegetación caracterizan la sucesión secundaria en hábitats improductivos; una rápida renovación de

las poblaciones y especies ocurre, especialmente en hábitats altamente productivos, durante la etapa de colonización inicial y desarrollo de la vegetación. Esto va seguido por tasas más bajas de reemplazo de especies, una vez que las ruderales han cedido su lugar a competidoras, tolerantes a las restricciones, la mayoría de las cuales son relativamente longevas. Entre otros mecanismos que tienden a frenar el ritmo en los cambios de la vegetación al final de la sucesión están la creciente escasez de condiciones apropiadas para el establecimiento de las plántulas, la baja producción de semillas y las tasas bajas de dispersión de muchas de las especies sucesionales tardías.

4.1.7. Densidad de especies en el pantano de Sta. Alejandrina, Minatitlán, Ver

En este estudio se abunda en la comunidad herbácea del tular, cuya característica define al pantano de Santa Alejandrina, Minatitlán, Ver., La especie dominante es *Typha domingensis* Pers, monocotiledóneas que alcanzan los 3 m de alto (Rzedowski 1978), cubren un área importante del área pantanosa, son áreas fangosas, en algunas áreas se encuentra asociado con el carrizal *Panicum elephantipes* Nees ex Trin, las especies codominantes son *Poligonum punctatum*, *Heliconia latispatha* Benthams, *Hydrocotyle bonariensis* Lam.

Estos datos están acordes según Diego-Pérez *et al.* (1993), a lo reportado ya que en algunas ocasiones el tular y el carrizal están asociados.

La información de la gráfica indica que *Cyperus elegans*, *Cyperus surinamensis*, *Echinochloa walteri* (Pursh) Sëller, *Pontederia sagittata*, conforman el 30% de la densidad total del pantano.

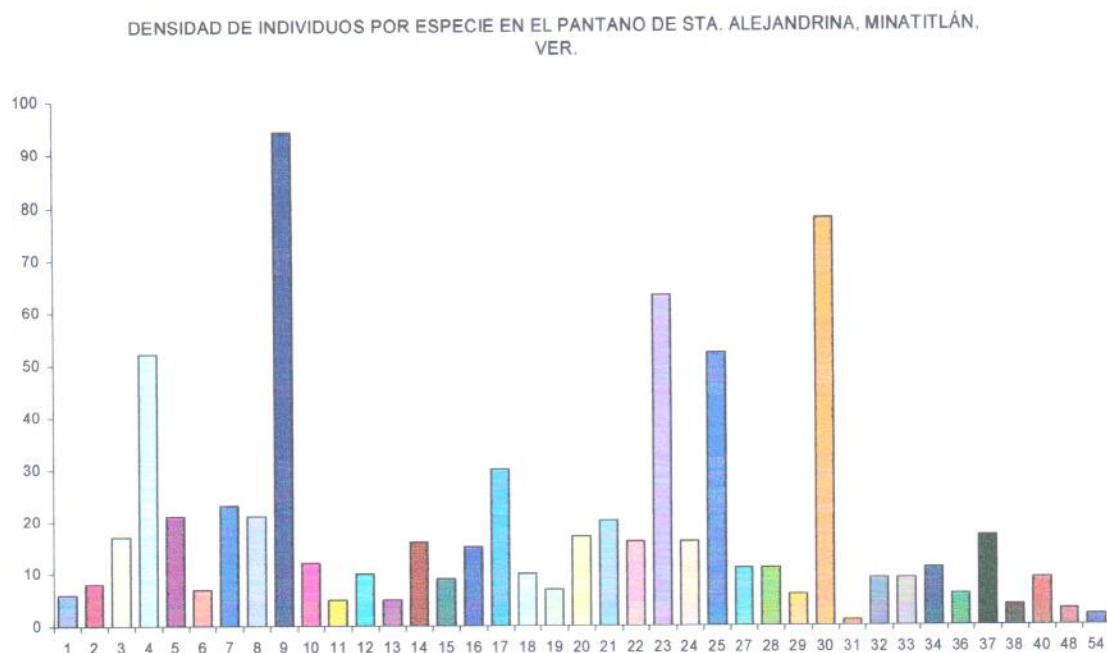


Figura 25. Densidad de individuos por especie en el pantano de Sta. Alejandrina, Minatitlán, Ver. 1 *Rhynchospora holoschoenoides* (Rich) Herter., 2 *Ageratum corymbosum* Zucc., 3 *Eleusine indica* (L.) Gaerth., 4 *Hydrocotyle bonariensis* Lam., 5 *Cyperus articulatus* L., 6 *Eleocharis cf. yacorensis* E. Roalson, 7 *Echinochloa walteri* (Pursh) Heller., 8 *Pontederia sagittata* C. Presl, 9 *Typha domingensis* Pers., 10 *Ludwigia leptocarpa* (Nutt) Hara., 11 *Polygonum punctatum* Ell., 12 *Echinochloa colonum* L., Lint, 13 *Ludwigia octovalvis* (Jacq.) Raven, 14 *Citharexylum hexangulare* Greenman, 15 *Eclipta prostrata* (L.) L., 16 *Avicennia germinans* L., 17 *Cyperus elegans* L., 18 *Brickellia pacyensis* Coult., 19 *Cyperus papyrus* L., 20 *Cyperus odoratus* L., 21 *Cyperus surinamensis*, 22 *Jussiaea peruviana* L. (H.) Hara., 23 *Polygonum punctatum* Ell., 24 *Cyperus lingularis* L., 25 *Heliconia latispatha* Benth., 27 *Trichilia havanensis* Jacq., 28 *Cecropia obtusifolia* Berthold, 29 *Lantana hispida* Kunth, 30 *Panicum elephantipes* Nees et Trin., 31 *Piper tuberculatum* Jacq., 32 *Citharexylum hexangulare* Greenman, 33 *Malvaviscus arboreus* Cav., 34 *Muntingia calabura*, 36 *Solanum rudepanum* Dunal., 37 *Citharexylum ellipticum* Sessé Moc., 38 *Cyperus giganteus*, 40 *Cissus sycioides, cisyoides* L., 48 *Eragrostis prolifera* (Sw.) Steud., 54 *Ceiba pentandra*.

La presencia de plantas acuáticas y de árboles en el pantano no es significativa su población, debido a que el estrato arbóreo se presenta solo en el último estrato sucesional, las plantas acuáticas tienen una gran densidad. Sin embargo, no se logro capturar esta información debido a que el acceso a la zona de estudio en época de lluvias es inaccesible por el contaminante de hidrocarburos y porque se inunda el pantano. El indicador es que forman parte de la materia orgánica conformando un sustrato rico en nutrientes permitiendo la colonización de nuevas especies.

4.1.8. Análisis de varianza para bloques al azar y comparación de medias (Tukey)

El análisis estadístico de bloques al azar las cinco asociaciones vegetales, con ocho repeticiones, con el 95% de confiabilidad, indica que las asociaciones son diferentes entre sí.

Se procedió a realizar la comparación de medias por el método de Tukey:

Cuadro 21. ANOVA para bloques completamente al azar

	Grados de libertad	Suma Cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr > F
Modelo	6	1638.914	273.15	32.46	<.0001
Error	722	6075.784	8.415		
S total	728	7714.698			

Cuadro 22. Comparación de medias por Tukey

ASOC		Confiabilidad del 95%			
Comparación		Media	Limites de confiabilidad		
4	- 5	0.0297	-0.9282	0.9876	
4	- 3	0.7654	-0.1232	1.6541	
4	- 1	2.0297	1.2185	2.8409	***
4	- 2	4.4578	3.4633	5.4523	***
5	- 4	-0.0297	-0.9876	0.9282	
5	- 3	0.7357	-0.2777	1.7491	
5	- 1	2.0000	1.0538	2.9462	***
5	- 2	4.4280	3.3207	5.5354	***
3	- 4	-0.7654	-1.6541	0.1232	
3	- 5	-0.7357	-1.7491	0.2777	
3	- 1	1.2643	0.3883	2.1403	***
3	- 2	3.6923	2.6443	4.7403	***
1	- 4	-2.0297	-2.8409	-1.2185	***
1	- 5	-2.0000	-2.9462	-1.0538	***
1	- 3	-1.2643	-2.1403	-0.3883	***
1	- 2	2.4280	1.4449	3.4112	***
2	- 4	-4.4578	-5.4523	-3.4633	***
2	- 5	-4.4280	-5.5354	-3.3207	***
2	- 3	-3.6923	-4.7403	-2.6443	***
2	- 1	-2.4280	-3.4112	-1.4449	***

La comparación de medias, indica que todas las asociaciones en este estudio son diferentes, aún dentro de los sitios. Los sitios 1 y 2 de las asociaciones 3, 4 y 5 son diferentes con respecto a sus repeticiones, lo que indica que la homogeneidad de los atributos valorados en las asociaciones es debido a su caracterización correcta. La asociación 1, 2 y 3, indica que los sitios tienen atributos diferentes entre sí, dadas las circunstancias de la evaluación y los procesos que se desarrollan en estas asociaciones

como es el proceso de inundación y de presencia del fuego, nos muestra estadísticamente este indicador.

En forma gráfica a través del análisis multivariado calculado a través del índice de Jaccard, se determinaron los dendrogramas.

4.1.9. Análisis de cluster entre sitios (Dendrogramas)

Con el Programa PC-ORD versión 4 (Mc Cune y Mefford, 1999) se analizaron 8 repeticiones de las cinco asociaciones, a partir del coeficiente de Jaccard. En el Dendrograma se aprecian agrupamientos de sitios de muestreos por sus diferencias obtenidas de la variable especies, determinada por una matriz binaria de presencia o ausencia por sitios de muestreo y por asociación.

En el análisis se observa que se generan redes de similitud en los sitios de muestreo cercano al 100%, esto es debido a que la especie dominante es de la familia Cyperaceae, ya que sus formas de vida pueden presentarse como acuática, subacuática y terrestre (Figura 26).

Sin embargo, los sitios de muestreo tienen similitud entre ellos por la presencia de especies comunes en abundancia, esto indica que la sucesión primaria en las asociaciones 1, 2 y 3, permite que las especies dominantes vayan desapareciendo conforme el medio se va modificando y permite la invasión de nuevas especies colonizadoras.

Conforme los sitios de muestreo aumentan la diferencia entre ellos es mayor lo cual indica que la presencia de especies va cambiando aún entre los mismos sitios, la heterogeneidad de especies es un indicador de aumento de diversidad.

En los últimos sitios de muestreo la diversidad es mucho mayor, ya que la similitud de especies es menor, lo cual indica que son en su mayoría muy diferentes al de las primeras asociaciones.

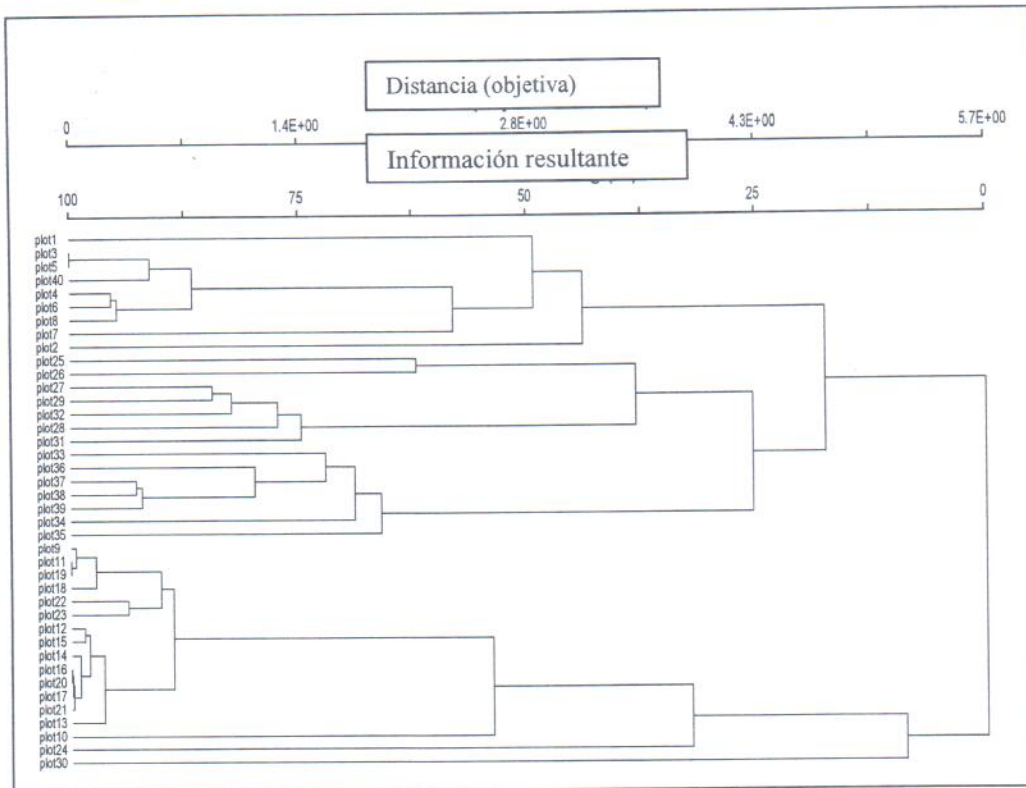


Figura 26. Dendrograma por sitios en las asociaciones vegetales

Análisis de cluster entre asociaciones

Se identificaron tres grupos o unidades de vegetación. De acuerdo con los resultados, la asociación 4 y 5 tienen mayor afinidad de especies que la asociación 1 y 4, debido a que las tres primeras asociaciones la colonización de especies ruderales se desarrolla y la sucesión primaria permite que en la asociación 4 y 5 invadan nuevas especies de estratos superiores.

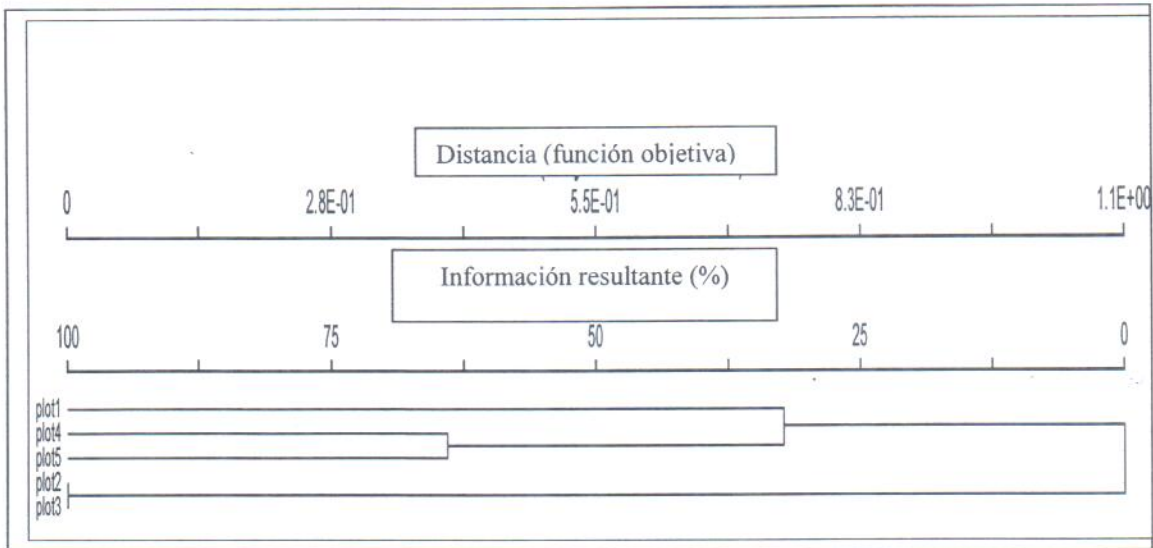


Figura 27. Dendrograma entre asociaciones vegetales. Donde: Plot 1= Asociación1, Plot 2= Asociación2, Plot 3= Asociación 3, Plot 4= Asociación 4, Plot 5= Asociación 5.

La asociación 2 y 3 tienen una afinidad de diversidad del 100%, debido a que predomina la familia Cyperaceae, la cual se presenta con diversas especies.

Todo esto arroja como resultado que los humedales se desarrollan en una compleja matriz ambiental, que contribuye a su heterogeneidad, lo que obviamente influye en el incremento de la diversidad.

4.1.10. Análisis del índice de Shannon-Wiener para el pantano

Las causas de la variación de la diversidad, no solo es un indicador el tipo de muestreo, sino también influyen muchos factores como el estado físico y biológico en que se encuentra el sitio y las condiciones propias de desarrollo para cada especie. La composición heterogénea y la pérdida de similitud, son determinadas por la dinámica del humedal y la influencia de agentes externos.

Se aplicó también el índice de Shannon - Wiener, arrojando los siguientes resultados para cada asociación.

Cuadro 23. Índice de Shannon-Wiener en el pantano de Sta. Alejandrina

	INDICE DE SHANNON (H)	No. DE ESPECIE	INDIVIDUOS
PANTANO DE SANTA ALEJANDRINA	-1.399871	39	729
ASOCIACIÓN 1	-1.271299	31	199
ASOCIACIÓN 2	-1.580506	45	97
ASOCIACIÓN 3	-1.294075	36	138
ASOCIACIÓN 4	-1.209961	26	173
ASOCIACIÓN 5	-1.581938	46	110

El índice de Shannon es un método útil para comparar la diversidad entre los diferentes hábitats, especialmente cuando se han tomado un cierto número de réplicas. La heterogeneidad del índice considera la uniformidad de la abundancia de especies (Peet, 1974).

Sin embargo, el cálculo del índice de Shannon-Wiener, resulta significativa su apreciación cuando se compara con índices de ecosistemas comunes. En este estudio no se encontraron reportes de índices de Shannon-Wiener de pantanos o humedales, con las características ecológicas similares al del pantano de Santa Alejandrina.

El indicador ecológico representativo en este estudio ha sido la heterogeneidad de especies en los diferentes estratos sucesionales, clasificados como asociaciones vegetales. Aunque el cálculo de este índice puede servir como un indicador para futuros estudios ecológicos de humedales.

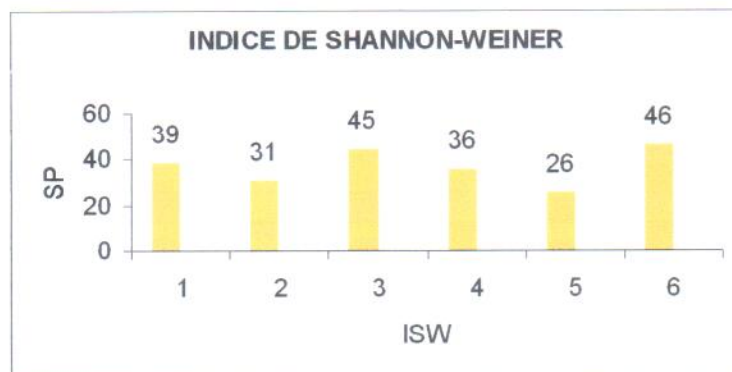


Figura 28. Variación de la heterogeneidad de especies por asociación. Donde: 1= pantano de Sta. Alejandrina, 2= Asociación 1, 3= Asociación 2, 4= Asociación 3, 5= Asociación 5, 6= Asociación 5.

La variación de diversidad para el pantano, en comparación con las asociaciones vegetales indica que la distribución o mayor diversidad es en la asociación 5, que es la última del estrato sucesional. En la asociación 3 marca una variación de diversidad grande con respecto a la del pantano, este es un indicador de la transición de especies herbáceas colonizadoras a especies sucesionales se realiza evidentemente en este estrato.

4.1.11. Cobertura

La cobertura en el estrato arbóreo es dominada por *Ceiba pentandra*, *Muntigia calabura* y *Piper tuberculatum*. Sin embargo, el estrato arbustivo es dominado por la cobertura del estrato herbáceo por las especies *Pontederia sagittata*, *Typha domingensis* y *Cyperus* spp.

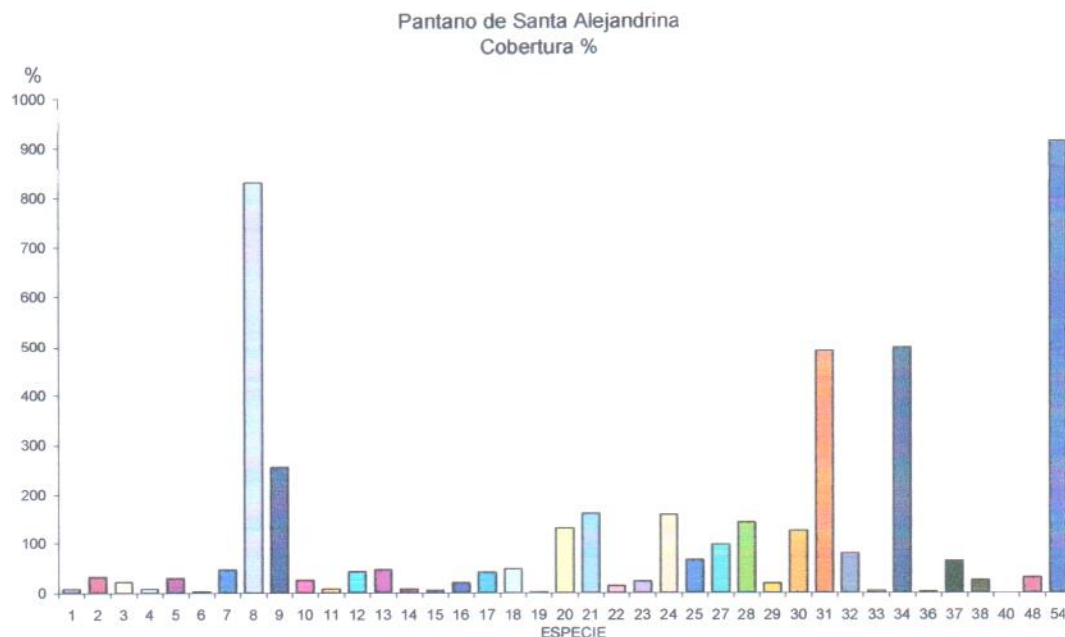


Figura 29. Cobertura del pantano de Santa Alejandrina. 1 *Rhynchospora holoschoenoides* (Rich) Herter., 2 *Ageratum corymbosum* Zucc., 3 *Eleusine indica* (L.) Gaertn., 4 *Hydrocotyle bonariensis* Lam., 5 *Cyperus articulatus* L., 6 *Eleocharis cf. yacorensis* E. Roalson, 7 *Echinochloa walteri* (Pursh) Heller., 8 *Pontederia sagittata* C. Presl, 9 *Typha domingensis* Pers., 10 *Ludwigia leptocarpa* (Nutt) Hara., 11 *Polygonum punctatum* Ell., 12 *Echinochloa colonum* L., Lint, 13 *Ludwigia octovalvis* (Jacq.) Raven, 14 *Citharexylum hexangulare* Greenman, 15 *Eclipta prostrata* (L.) L., 16 *Avicennia germinans* L., 17 *Cyperus elegans* L., 18 *Brickellia pacyensis* Coult., 19 *Cyperus papyrus* L., 20 *Cyperus odoratus* L., 21 *Cyperus surinamensis*, 22 *Jussiaea peruviana* L. (H.) Hara., 23 *Polygonum punctatum* Ell., 24 *Cyperus lingularis* L., 25 *Heliconia latispatha* Benth., 27 *Trichilia havanensis* Jacq., 28 *Cecropia obtusifolia* Berthold, 29 *Lantana hispida* Kunth, 30 *Panicum elephantipes* Nees ex Trin., 31 *Piper tuberculatum* Jacq., 32 *Citharexylum hexangulare* Greenman, 33 *Malvaviscus arboreus* Cav., 34 *Muntigia calabura*, 36 *Solanum ruderpanum* Dunal., 37 *Citharexylum ellipticum* Sessé Moc., 38 *Cyperus giganteus*, 40 *Cissus sycioides, cisyoides* L., 48 *Eragrostis prolifera* (Sw.) Stend, 54 *Ceiba pentandra*.

4.2. Descripción de las asociaciones vegetales en el Pantano de Santa Alejandrina, Minatitlán, Ver

4.2.1. Asociación vegetal 1

A.- Ciperáceas hasta 50 cm de altura: La superficie se encuentra cubierta por agua en la época de lluvias, permitiendo se desarrolle la vegetación acuática, principalmente por nenúfares. En la época de sequía la vegetación de nenúfares (*Nimphaea elegans* Hooker, *Nimphaea fallax* Ornduff), queda como sustrato orgánico sobre el contaminante de hidrocarburo ya que tiene una consistencia aceitosa y permite que se establezcan otras especies vegetales. Existen áreas en las que el contaminante por hidrocarburos está expuesto al ambiente debido a que fueron las últimas descargas que se hicieron por parte de la Refinería; no se encuentra vegetación, en algunas áreas, se observan aisladas Ciperáceas (Figura 30), estos lodos aceitosos con las temperaturas que llegan a oscilar por arriba de los 30° C en el pantano se incendia y se carbonizan.

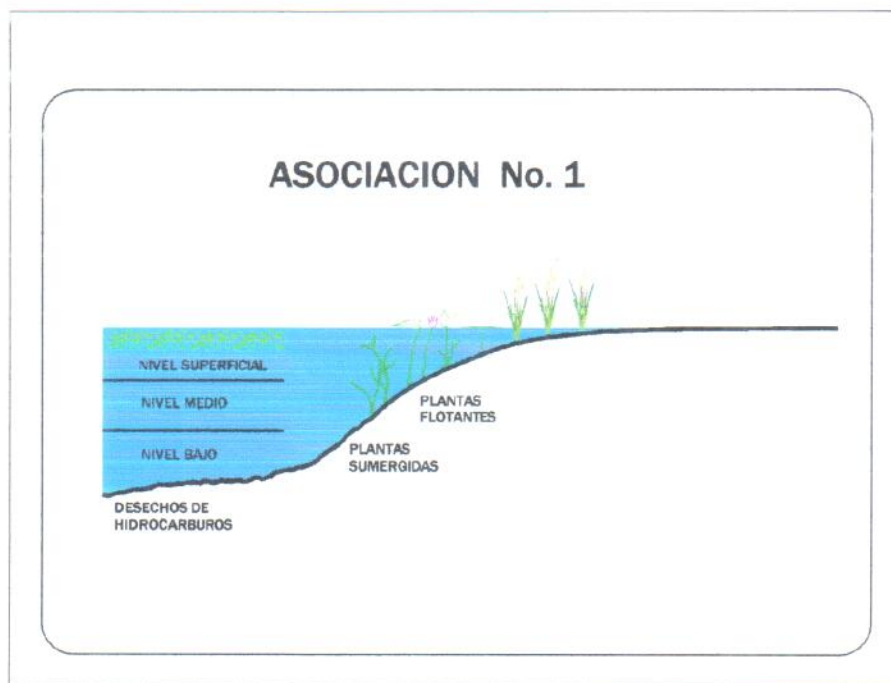


Figura 30. Representación de la Asociación 1 con respecto al pantano

El sustrato contaminado calcinado queda en forma de rocas agrietadas permitiendo a las semillas de las Ciperáceas que invadan las grietas e inicie la colonización. Por último, en algunas zonas los depósitos de contaminantes son muy profundos, por esta razón el humedal se convierte en un pantano contaminado, sin consistencia en el sustrato no permite su acceso con peligro a hundirse.

Cuadro 25. Vegetación colonizadora en la asociación vegetal 1

Especie	Familia
<i>Ageratum corymbosum</i> Zuccagni.	Asteraceae
<i>Eclipta prostrata</i> (L.) L.	Asteraceae
<i>Hydrocotyle bonariensis</i> Comm. Ex Lam. X.H.	Apiaceae
<i>Avicennia germinans</i> L.	Avicenniaceae
<i>Rhynchospora holoschoenoides</i> (Rich) Herter.	Cyperaceae
<i>Eliocharis cf yacorensis</i> E. Roalson	Cyperaceae
<i>Cyperus articulatus</i> L.	Cyperaceae
<i>Eleusine indica</i> (L.) Gaerth	Gramineae
<i>Echinochloa walteri</i> (Pursh) Heller.	Gramineae
<i>Echinochloa colonum</i> L., Lint	Gramineae
<i>Ludwigia leptocarpa</i> (Nutt) Hara.	Onagraceae
<i>Ludwigia octovalvis</i> (Jacq.) Raven.	Onagraceae
<i>Pontederia sagittata</i> C. Presl.	Pontederiaceae
<i>Polygonum punctatum</i> Ell.	Poligonaceae
<i>Typha domingensis</i> Pers.	Typhaceae
<i>Citharexylum hexangulare</i> Greenm.	Verbenaceae

La característica principal de la asociación vegetal 1 es que no tiene la mínima formación de suelo, las plantas tienen una altura máxima de 50 cm hasta 2 m de altura, amacolladas y predomina el tular (*Typha domingensis* Pers.) y la familia Cyperaceae.

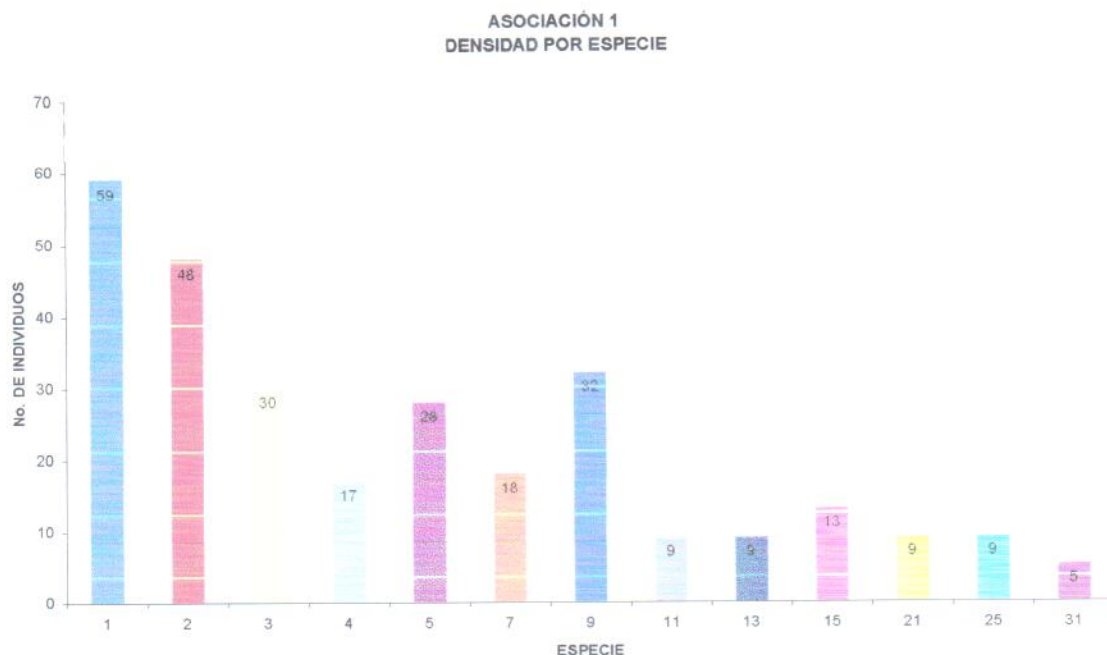


Figura 31. Densidad de individuos por especie en la asociación 1.

1 *Rhynchospora holoschoenoides* (Rich) Herter., 2 *Ageratum corymbosum* Zucc., 3 *Eleusine indica* (L.) Gaerth, 4 *Hydrocotyle bonariensis* Lam., 5 *Cyperus articulatus* L., 7 *Echinochloa walteri* (Pursh) Heller., 9, 11 *Polygonum punctatum* Ell., 13 *Ludwigia octovalvis* (Jacq.) Raven, 15 *Eclipta prostrata* (L.) L., 21 *Cyperus surinamensis* Rotth, 25 *Heliconia latispatha* Benth, 31 *Piper tuberculatum* Jacq.

La especie dominante es *Rhynchospora holoschoenoides* (Rich) Verter, es el pasto que crece inmediatamente después del límite de agua; las plantas codominantes son *Typha domingensis* Pers, *Eleusine indica* (L.) Gaerth, *Cyperus surinamensis* Rotth y *Ageratum corymbosum* Zucc.



Figura 32. Invasión de nenúfares y Ciperáceas. Pantano de Santa Alejandrina, Minatitlán, Ver., difícil acceso debido a la falta de consistencia del sustrato



Figura 33. Cubierta de nenúfares sobre el sustrato de hidrocarburo.
Permite que se establezcan los pastos de la familia Cyperaceae

La cobertura en la asociación uno es dominada por la especie de *Typha domingensis*, debido a que forma grandes colonias en el límite acuático del pantano, sin embargo, el resto de las especies su cobertura oscila en un 10 % ya que son plantas invasoras aisladas en la superficie del sustrato.



Figura 34. Asociación vegetal 1

Las ciperáceas colonizan por medio de semillas. Desecho del hidrocarburo expuesto, difícil acceso.

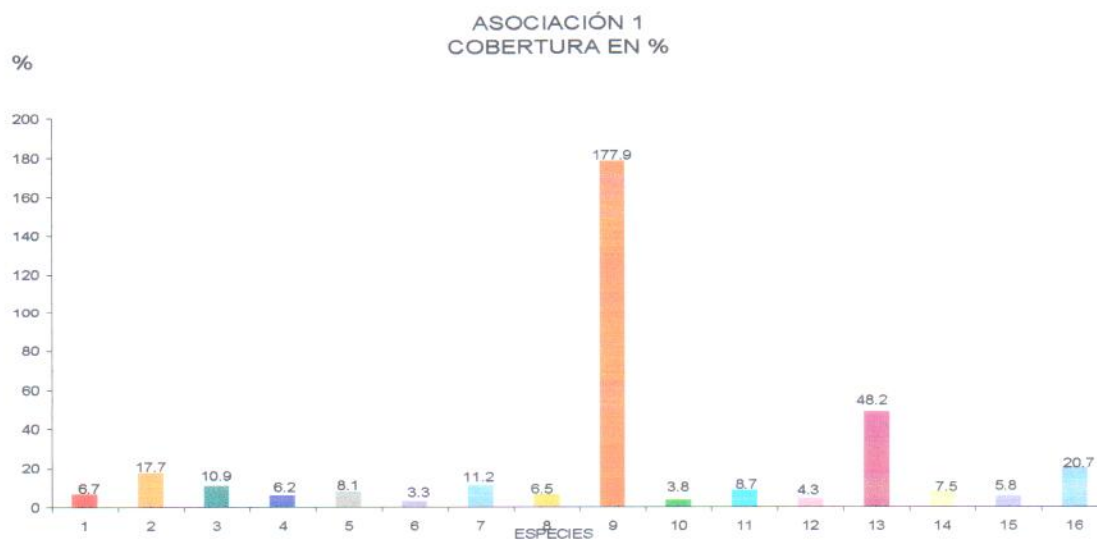


Figura 35. Densidad de individuos por especie en la asociación 1., 1 *Rhynchospora holoschoenoides* (Rich) Herter., 2 *Ageratum corymbosum* Zucc. 3 *Eleusine indica* (L.) Gaerth, 4 *Hydrocotyle bonariensis* Lam. 5 *Cyperus articulatus* L., 6 *Eliocharis* cf *yacorensis* E. Roalson, 7 *Echinochloa walteri* (Pursh) Heller., 8 *Pontederia sagittata* C. Presl, 9 *Typha domingensis* Pers., 10 *Ludwigia leptocarpa* (Nutt) Hara., 11 *Polygonum punctatum* Ell., 13 *Ludwigia octovalvis* (Jacq.) Raven, 15 *Eclipta prostrata* (L.) L., 16 *Avicennia germinans* L.

4.2.2. Asociación vegetal 2

B.- Ciperáceas asociadas con gramíneas: El sustrato de hidrocarburos está más consistente y en su gran mayoría expuesto al sol, no predominan las zonas inundables y al igual que en la asociación vegetal no.1, cuando la insolación es muy intensa, tiende a incendiarse y después se carboniza, formando huecos en el sustrato, lugar en el cual las semillas germinan. Se encuentran agrupaciones de ciperáceas, con diferentes especies, también en asociación con agrupaciones de gramíneas. Las plantas aproximadamente tienen la altura de 50 cm - 1 m; es un sitio con mayores valores de diversidad.

Cuadro 26. Vegetación colonizadora en la asociación vegetal 2

Especie	Familia
<i>Avicennia germinans</i> (L.) L.	Avicenniaceae
<i>Cyperus articulatus</i> L.	Cyperaceae
<i>Cyperus elegans</i> L.	Cyperaceae
<i>Cyperus papyrus</i> L.	Cyperaceae
<i>Cyperus odoratus</i> L.	Cyperaceae
<i>Cyperus surinamensis</i>	Cyperaceae
<i>Cyperus lingularis</i> L.	Cyperaceae
<i>Brickellia pacyensis</i> Coult.	Compisitae
<i>Eleusine indica</i> (L.) Gaerth	Gramineae
<i>Echinochloa colonum</i> L., Lint	Gramineae
<i>Ludwigia leptocarpa</i> (Nutt) Hara.	Onagraceae
<i>Jussiaea peruviana</i> L. (H.) Hara.	Onagraceae
<i>Polygonum punctatum</i> Ell.	Polygonaceae

La característica principal de la asociación 2 es que el sustrato está compacto, se incendia con mucha frecuencia y la carbonización permite que el agua en las grietas del sustrato sea el medio para que la invasión sea más agresiva, así como de la diversidad de especies de ciperáceas y gramíneas, inicia la colonización de otras especies.



Figura 36. Esquema de la asociación 2

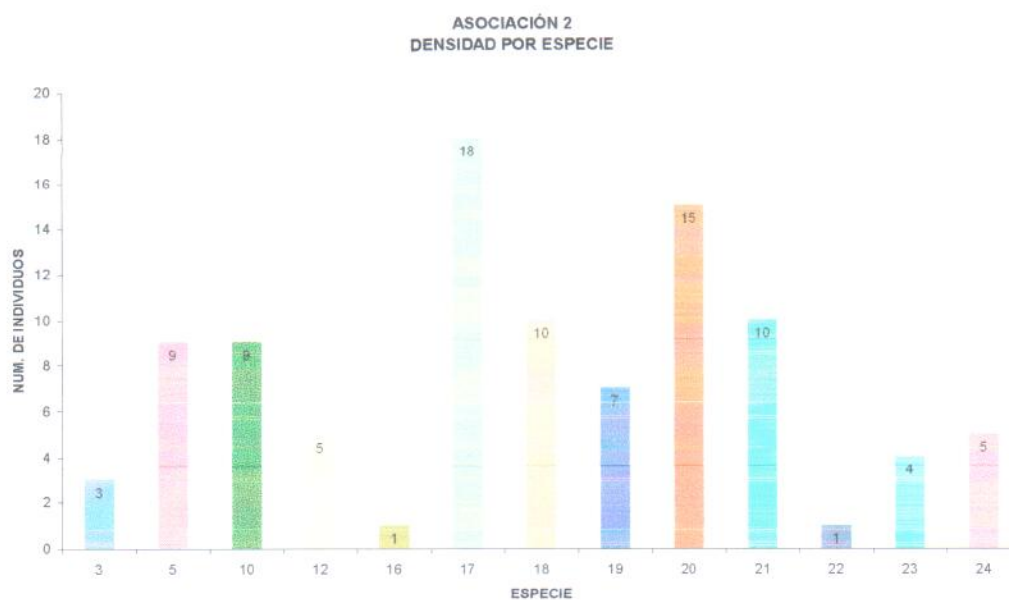


Figura 37. Densidad de individuos por especie en la asociación 2., 3 *Eleusine indica* (L.) Gaertn., 5 *Cyperus articulatus* L., 10 *Ludwigia leptocarpa* (Nutt) Hara., 16 *Avicennia germinans* L., 17 *Cyperus elegans* L., 18 *Brickellia pacyensis* Coult., 19 *Cyperus papyrus* L., 20 *Cyperus odoratus* L., 21 *Cyperus surinamensis*, 22 *Jussiaea peruviana* L. (H.) Hara., 23 *Poligonum punctatum* Ell., 24 *Cyperus lingularis* L.

En la Figura 37 la familia importante representativa de esta asociación es la Cyperaceae, en la cual la especie dominante es *Cyperus elegans* y las especies codominantes fueron *Cyperus odoratus* L., *Brikellia pacyensis* Coult., *Cyperus surinamensis* Roth., *Cyperus articulatus* L., *Cyperus papyrus* L. y *Ludwigia leptocarpa* (Nutt) Hara.



Figura 38. Asociación Vegetal 2. El sustrato contaminado por hidrocarburos se encuentra seco, es accesible la entrada a la asociación, hay una gran diversidad de especies de la familia Cyperaceae, inicia la colonización con Gramíneas y otras especies.



Figura 39. Exposición directa al sol del desecho de hidrocarburos.

Lo cual genera que se incendie y carbonice, permitiendo que su estructura cambie, favorece la colonización de especies ruderales.

La especie de mayor cobertura en la asociación 2 es *Cyperus odoratus*, esto se debe a que la especie se propaga en el mismo lugar formando colonias, las cuales cubren gran parte de la superficie, sobreponiéndose entre estas dando un porcentaje del 71.0%. Esta característica de reproducción la tiene de igual manera *Cyperus elegans*.

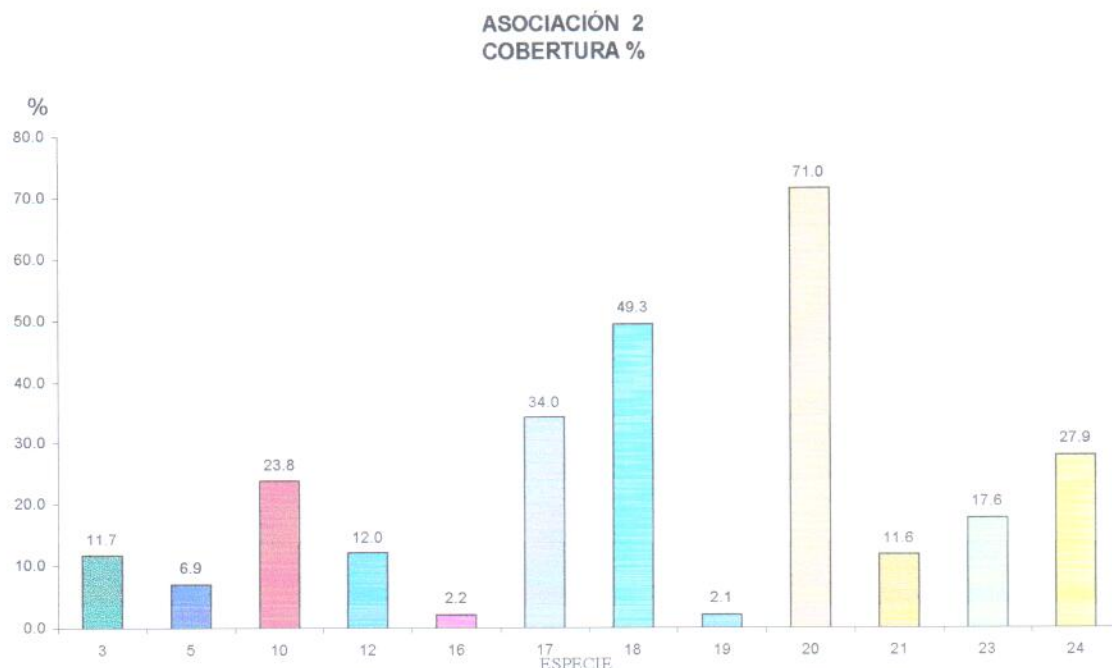


Figura 40. Cobertura en porcentaje de la Asociación 2; 2 *Eleusine indica* (L.) Gaertn., 5 *Cyperus articulatus* L., 10 *Ludwigia leptocarpa* (Nutt) Hara, 12 *Echinochloa colonum* L., 16 *Avicennia germinans* L., 17 *Cyperus elegans* L., 18 *Brickellia pacyensis* Coult., 19 *Cyperus papyrus* L., 20 *Cyperus odoratus* L., 21 *Cyperus surinamensis*, 23 *Polygonum punctatum* Ell., 24 *Cyperus lingularis* L.

4.2.3. Asociación vegetal 3

C.- Ciperáceas asociadas con plantas rastreras y otras especies: Se observa una placa vegetal acumulada por las anteriores sucesiones de plantas encima del sustrato contaminado; las Ciperáceas se amacollan, permitiendo cubrir en su mayoría el sustrato de residuos de hidrocarburos, su reproducción es por semillas, pero caen al raz de la planta madre permitiendo agregarse conforme finalizan los ciclos de reproducción, las plantas se convierten en sustrato para permitir el desarrollo de una nueva Ciperácea, especies de otras familias inician la colonización, como plantas rastreras de la familia Convolvulaceae No se presentan incendios.

La principal característica de la asociación vegetal No. 3, consiste en que las Ciperaceas cubren en su totalidad la superficie con material seco y hay una dinámica de colonización por parte de otras especies, el contaminante por hidrocarburo se mezcla con la materia orgánica, pierde en algunas áreas la coloración de negro a sustrato de color café, aunque se pueden encontrar trozos del hidrocarburo calcinado. En algunas áreas pastorea el ganado.

Cuadro 27. Especies encontradas en la asociación vegetal 3

Especie	Familia
<i>Rhynchospora holoschoenoides</i> (Rich) Herter	Cyperaceae
<i>Cyperus elegans</i> L.	Cyperaceae
<i>Cyperus surinamensis</i>	Cyperaceae
<i>Cyperus giganteus</i> (Vahl)	Cyperaceae
<i>Cyperus lingularis</i> L.	Cyperaceae
<i>Echinochloa colonum</i> L., Lint	Gramineae
<i>Eragostis prolifera</i> (Sw.) Stend	Gramineae
<i>Jussiaea peruviana</i> L. (H.) Hara.	Onagraceae
<i>Polygonum punctatum</i> Ell.	Poligonaceae
<i>Echinochloa walteri</i> (Pursh) Heller.	Poaceae
<i>Typha domingensis</i> Pers	Typhaceae
<i>Hydrocotyle bonariensis</i> Lam	Umbellifera

La principal característica de la asociación vegetal No. 3, consiste en que las Ciperaceas cubren en su totalidad la superficie con material seco y hay una dinámica de colonización por parte de otras especies, el contaminante por hidrocarburo se mezcla con la materia orgánica, pierde en algunas áreas la coloración de negro a sustrato de color café, aunque se pueden encontrar trozos del hidrocarburo calcinado. En algunas áreas pastorea el ganado.



Figura 41. Representación de la asociación 3 con respecto al pantano

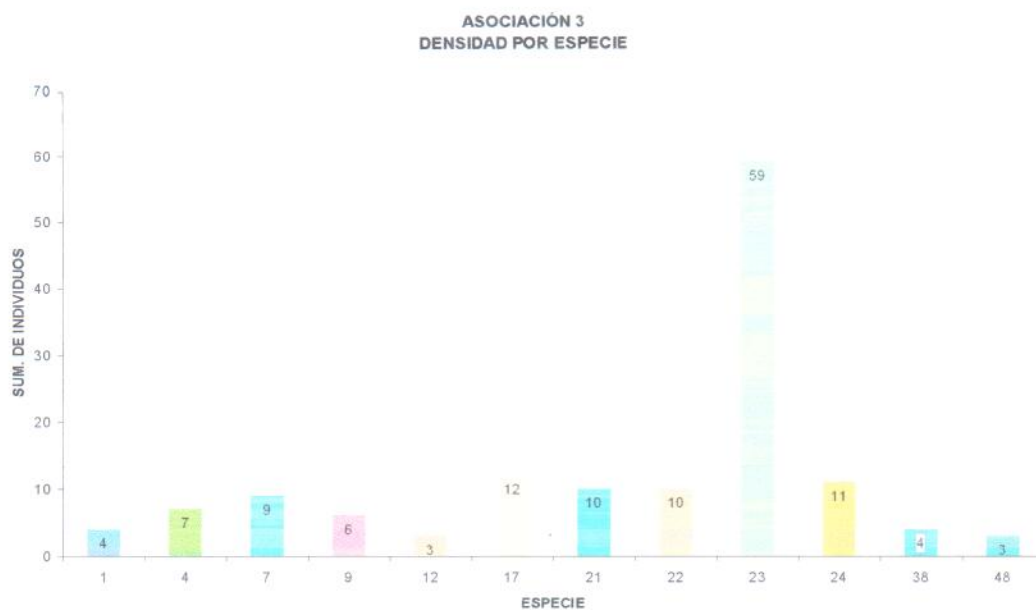


Figura 42. Densidad de individuos por especie en la asociación 3, 1. *Rhynchospora holoschoenoides* (Rich) Herter, 4 *Hydrocotyle bonariensis* Lam, 7 *Echinochloa walteri* (Pursh) Heller., 9 *Typha domingensis* Pers. 12 *Echinochloa colonum* L., Lint, 17 *Cyperus elegans* L., 21 *Cyperus surinamensis* Roth., 22 *Jussiaea peruviana* L. (H.) Hara., 23 *Polygonum punctatum* Ell., 24. *Cyperus lingularis* L., 38, *Cyperus giganteus* Vahl., 48. *Eragostis prolifera* (Sw.) Stend.

Polygonum punctatum, es en la asociación 3, la especie más representativa, debido a que en el muestreo había una gran cantidad de plántulas de esta especie, su altura oscila de 8 a 25 cm, debido a esta característica, las siguientes especies: *Cyperus elegans* L., *Cyperus surinamensis* Roth., *Jussiaea peruviana* L. (H.) Hara, *Cyperus lingularis* L. *Echinochloa walteri* (Pursh) Heller.



Figura 43. Asociación vegetal no. 3. Las especies de la Familia de Ciperáceas, permiten generar sustrato ya que su ciclo reproductivo es corto y la siguiente generación se desarrolla al raz de la planta madre.

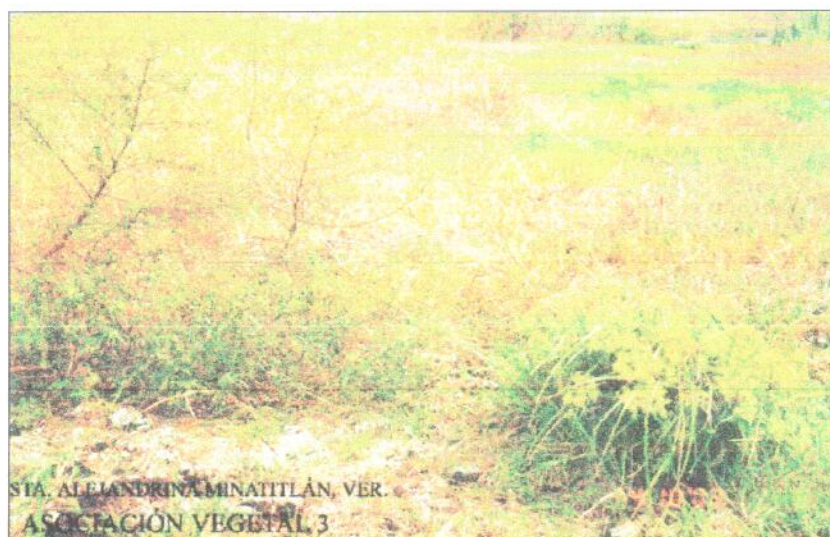


Figura 44. Asociación vegetal 3, mayor diversidad. Rastreras, pastos de otras familias y arbustos. La sucesión ecológica avanza.

En la asociación es de 436% de cobertura, las especies que mayor superficie ocupan son las del género *Cyperus*, con dos especies *surinamensis* y *lingularis*. El resto de las especies cubren solo un 40% de la superficie, lo cual favorece a que haya espacios abiertos para la colonización de otras especies.

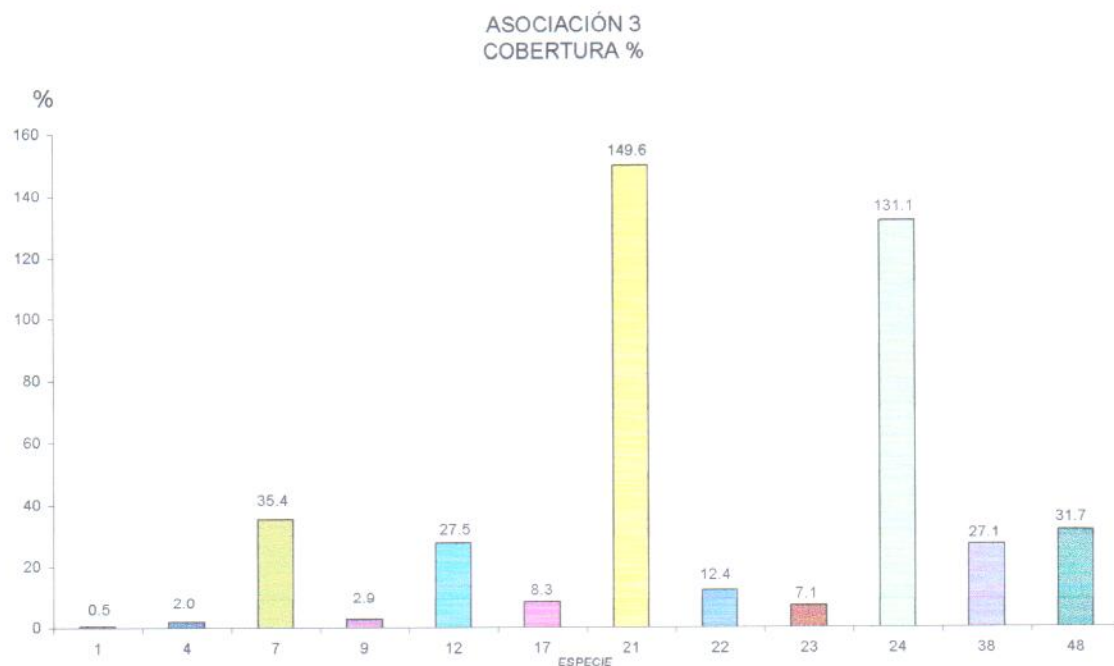


Figura 45. Cobertura en porcentaje de la Asociación 3; 1. *Rhynchospora holoschoenoides* (Rich) Herter, 4 *Hydrocotyle bonariensis* Lam, 7 *Echinochloa walteri* (Pursh) Heller., 9 *Typha domingensis* Pers. 12 *Echinochloa colonum* L., Lint, 17 *Cyperus elegans* L., 21 *Cyperus surinamensis* Roth., 22 *Jussiaea peruviana* L. (H.) Hara., 23 *Polygonum punctatum* Ell., 24. *Cyperus lingularis* L., 38, *Cyperus giganteus* Vahl., 48. *Eragostis prolifera* (Sw.) Stend.

4.2.4. Asociación vegetal 4

D.- Ciperáceas con tulares y carrizal: Dentro del humedal el sustrato de hidrocarburos está cubierto por nenúfares, *Typha domingensis* Pers. y predomina el carrizo. Las áreas se encuentran mezcladas con este tipo de vegetación. Conforme se seca el sustrato de hidrocarburos, el agua que queda almacenada por las lluvias; empieza a mezclarse con arcillas de suelo colindante al humedal y la vegetación seca de estaciones anteriores. Las ciperáceas alcanzan una altura de casi 5 m, asociadas principalmente con el carrizo que alcanza alturas 8 m de altura.

Cuadro 28. Vegetación por familia de la Asociación vegetal 4

Especie	Familia
<i>Cyperus odoratus</i> L.	Cyperaceae
<i>Cecropia obtusifolia</i> Bertol.	Cecropiaceae
<i>Panicum elephantipes</i> Nees ext Trin	Gramineae
<i>Heliconia latispatha</i> Benth	Heliconiaceae
<i>Trichilia havanensis</i> Jacq.	Meliaceae
<i>Jussiaea peruviana</i> L. (H.) Hara.	Onagraceae
<i>Pontederia sagittata</i> C. Presl.	Pontederiaceae
<i>Eragrostis prolifera</i> (Sw.) Stend.	Poaceae
<i>Piper tuberculatum</i> Jacq.	Piperaceae
<i>Typha domingensis</i> Pers.	Typhaceae
<i>Lantana hispida</i> Kunth.	Verbenaceae

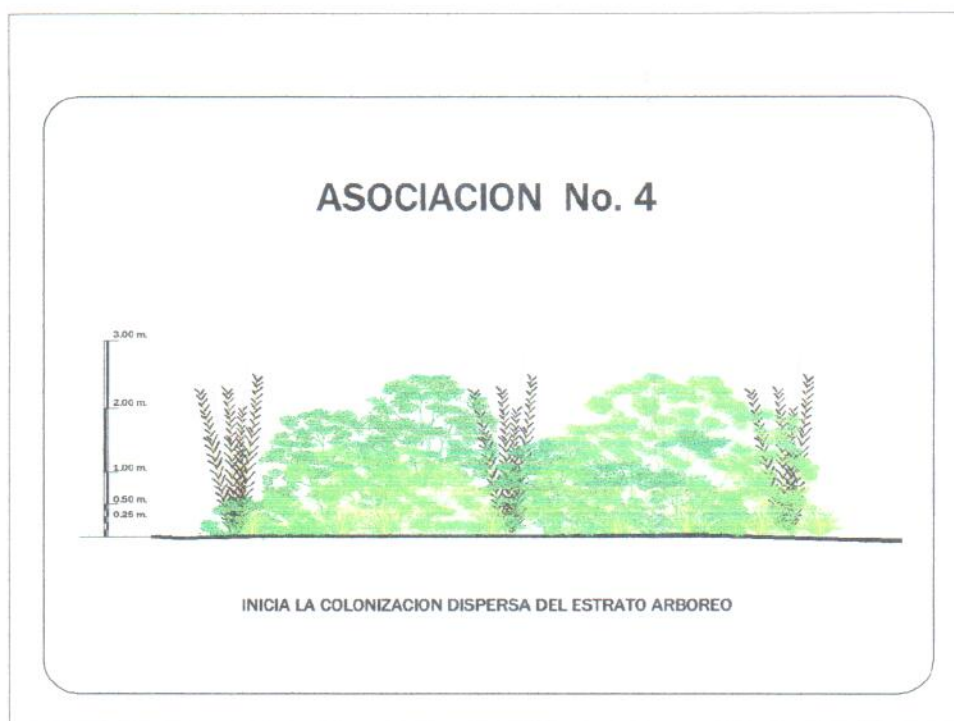


Figura 46. Representación de la asociación 4 con respecto al pantano

La característica principal de la asociación no.4, es la presencia de carrizo, aunque en algunas áreas que son inundables se intercalan con el tular, la altura promedio es de 3m, inicia la colonización dispersa del estrato arbóreo.

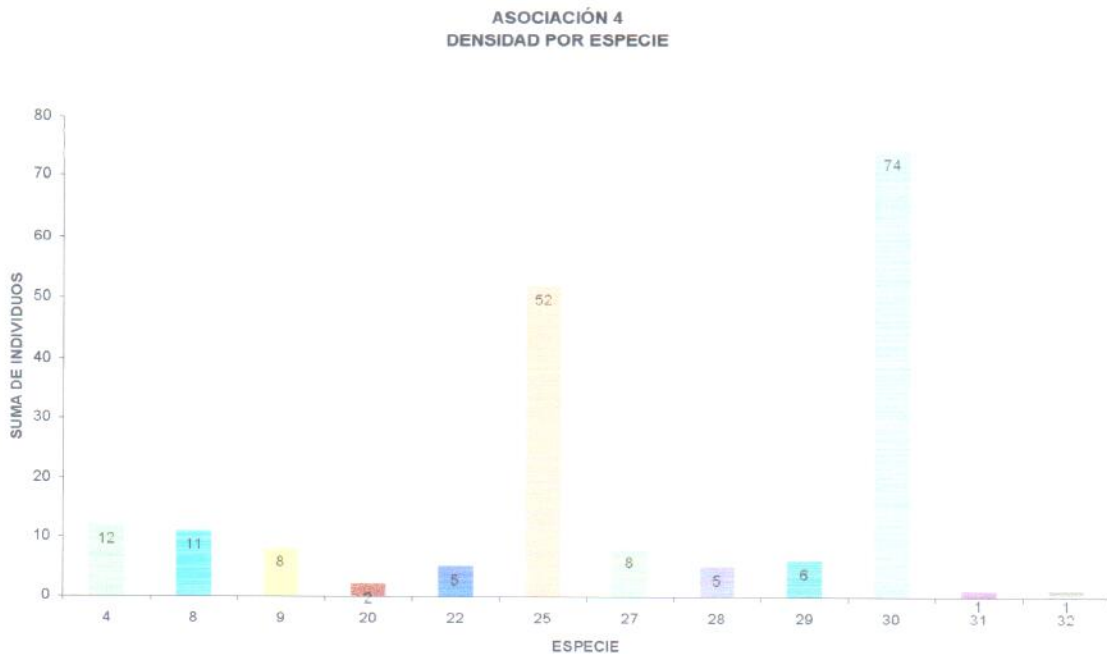


Figura 47. Densidad de individuos por especie en la asociación 4., 4 *Hydrocotyle bonariensis* Lam., 8 *Pontederia sagittata* C. Presl, 9 *Typha domingensis* Pers., 20 *Cyperus odoratus* L., 22 *Jussiaea peruviana* L. (H.) Hara., 25 *Heliconia latispatha* Benth., 27 *Trichilia havanensis* Jacq., 28 *Cecropia obtusifolia* Bertol., 29 *Lantana hispida* Kunth, 30 *Panicum elephantipes* Nees ext Trin, 31 *Piper tuberculatum* Jacq., 32 *Citharexylum hexangulare* Greenman,

Panicum elephantipes Nees ext Trin, es la especie que caracteriza a esta asociación, por su abundancia, su característica principal es que alcanza alturas de hasta 3 m de altura y frecuentemente se asocia con la *Typha domingensis* Pers; en este caso la asociación solo se presentó en una pequeña área, no resultando significativa. Una característica de esta asociación es que el nivel del agua había cubierto esta área en época de lluvias, el sustrato es fangoso y *Heliconia latispatha* Benth se estableció en comunidades colocándola como una especie codominante.



Figura 48. Asociación vegetal no. 4, nuevamente la inundación y sequía se presentan en esta asociación, los nenúfares, el tular, carrizo y las ciperáceas son las especies características que marcan el entorno del sitio. Se intercalan con las áreas de distribución del carrizo.

La mayor cobertura de la asociación 4, es por parte de las especies *Pontederia sagittata* y *Piper tubérculatum*, forman colonias, las cuales se sobreponen y crean una cobertura, que no permite ningún espacio en el sustrato, además que son especies que con facilidad al morir se agregan al suelo en forma de materia orgánica.



Figura 49. El carrizo es la especie dominante, la altura promedio es de 3 m, se intercalan árboles muy dispersos, la materia orgánica es abundante, el sustrato se mezcla con el suelo original de la zona.

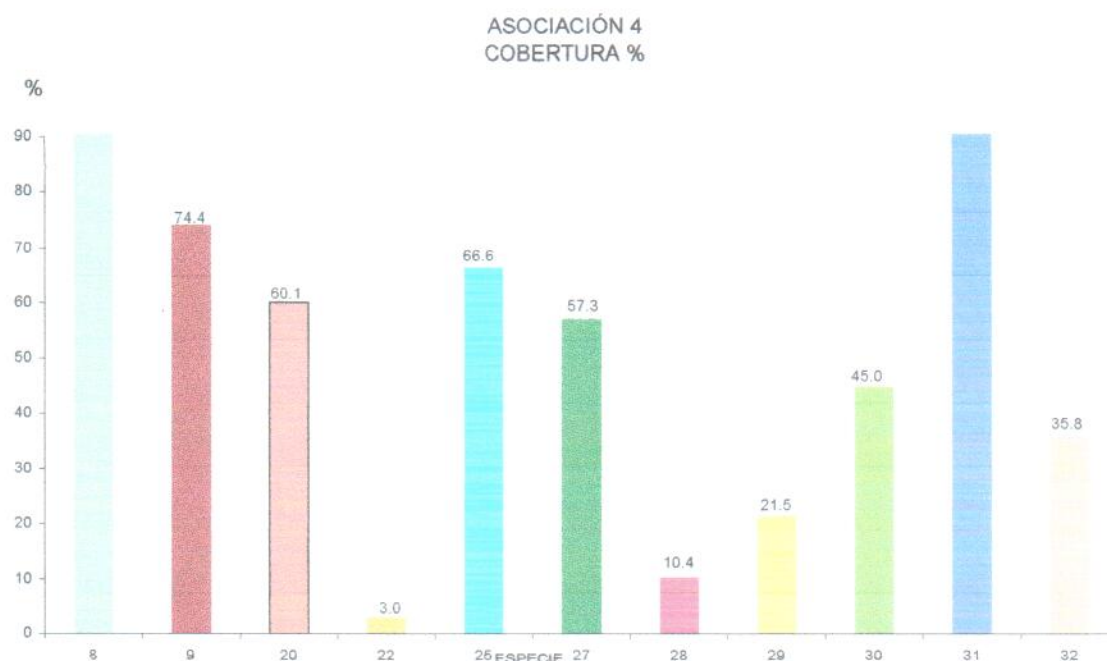


Figura 50. Cobertura de la asociación 4. 8 *Pontederia sagittata* C. Presl, 9 *Typha domingensis* Pers., 20 *Cyperus odoratus* L., 22 *Jussiaea peruviana* L. (H.) Hara., 25 *Heliconia latispatha* Benth., 27 *Trichilia havanensis* Jacq., 28 *Cecropia obtusifolia* Bertol, 29 *Lantana hispida* Kunth, 30 *Panicum elephantipes* Nees ex Trin, 31 *Piper tuberculatum* Jacq., 32 *Citharexylum hexangulare* Greenman,

Sin embargo, como los tres estratos ya están definidos en esta asociación, la cobertura por el resto de las especies también cubre la superficie desprovista de vegetación.

4.2.5. Asociación vegetal 5

E.- Árboles: Los árboles se encuentran en el acordonamiento del humedal, el sustrato de hidrocarburos, en su mayoría se encuentra mezclado con el suelo arcilloso originario del lugar, en algunas secciones no puede notarse el sustrato del hidrocarburo ya que ha sido completamente mezclado con la vegetación seca y el suelo original. Árboles asociados con Ciperáceas, carrizales y especies herbáceas. Generalmente ubicados al contorno del área contaminada.

La característica principal de esta asociación es que el sustrato esta completamente **mezclado** con la arcilla de suelo del lugar, predominan los árboles, la asociación **acordona** el área contaminada.

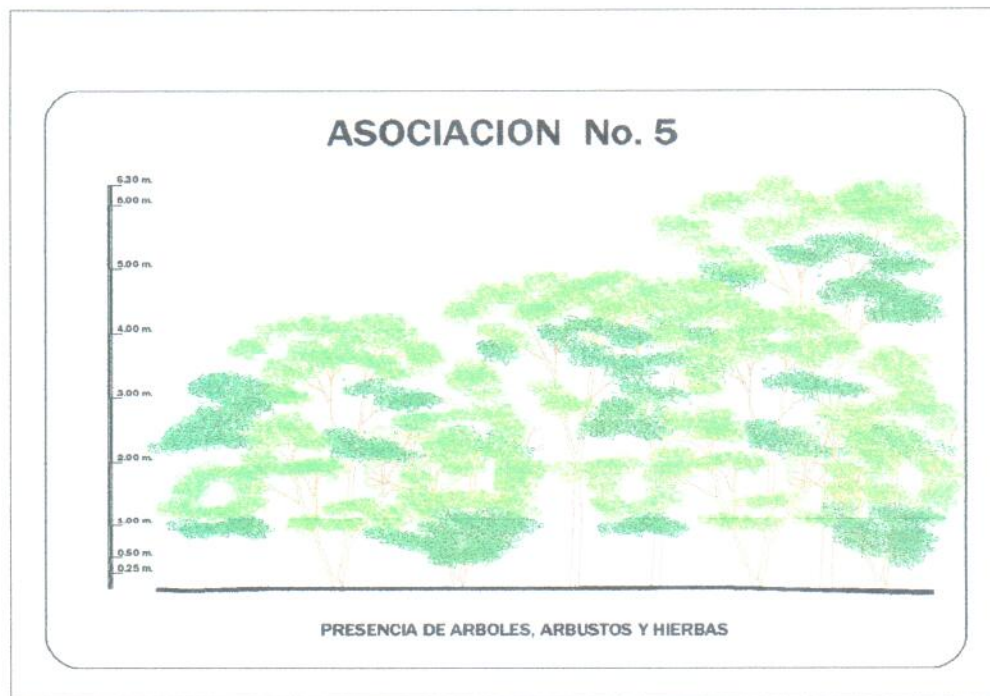


Figura 51. Representación de la asociación 5 con respecto al pantano

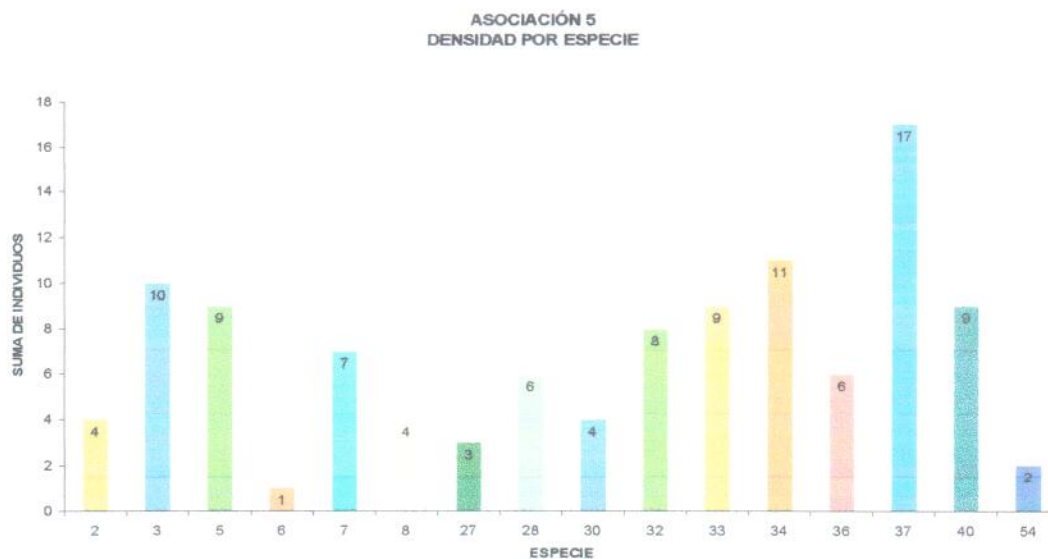


Figura 52. Densidad de individuos por especie en la asociación 5., 2 *Ageratum corymbosum* Zucc., 3 *Eleusine indica* (L.) Gaerth, 5 *Cyperus articulatus* L., 6 *Eliocharis cf yacorensis* E. Roalson, 7 *Echinochloa walteri* (Pursh) Heller., 8 *Pontederia sagittata* C. Presl, 27 *Trichilia havanensis* Jacq., 28 *Cecropia obtusifolia* Bertol, 30 *Panicum elephantipes* Nees ext Trin, 32 *Citharexylum hexangulare* Greenman, 33 *Malvaviscus arboreus* Cav., 34 *Muntigia calabura*, 36 *Solanum rudepanum* Dunal., 37 *Citharexylum ellipticum* Sessé Moc., 40 *Cissus sycioides* L., 54 *Ceiba pentandra*.

Citharexylum ellipticum Sessé Moc., es un árbol, que se encuentra distribuido en los límites de la zona inundable del pantano y también, intercalado dentro del dosel, como especies codominantes surge *Muntigia calabura* L., *Malvaviscos arboreus* Cav. y *Eleusine indica* (L.) Gaerth. Aún cuando la característica principal de esta asociación es que se presentan los tres estratos vegetales, es decir hierbas, arbustos y árboles, conformándose como una asociación que contiene mayor diversidad, la familia Cyperaceae, permanece con la especie *C. articulatus* L.; característica vegetal que distingue al pantano.



Figura 53. Asociación 5, se caracteriza por la presencia de de árboles, arbustos y hierbas, el suelo original esta mezclado con el sustrato y no puede distinguirse tan fácilmente las características físicas del residuo de hidrocarburos.

La cobertura en la asociación cinco, la diversidad de especies y de estratos, permite que el estrato arbóreo sea dominante con las especies *Ceiba pentandra*, *Muntigia calabura* y *Cecropia obtusifolia*.

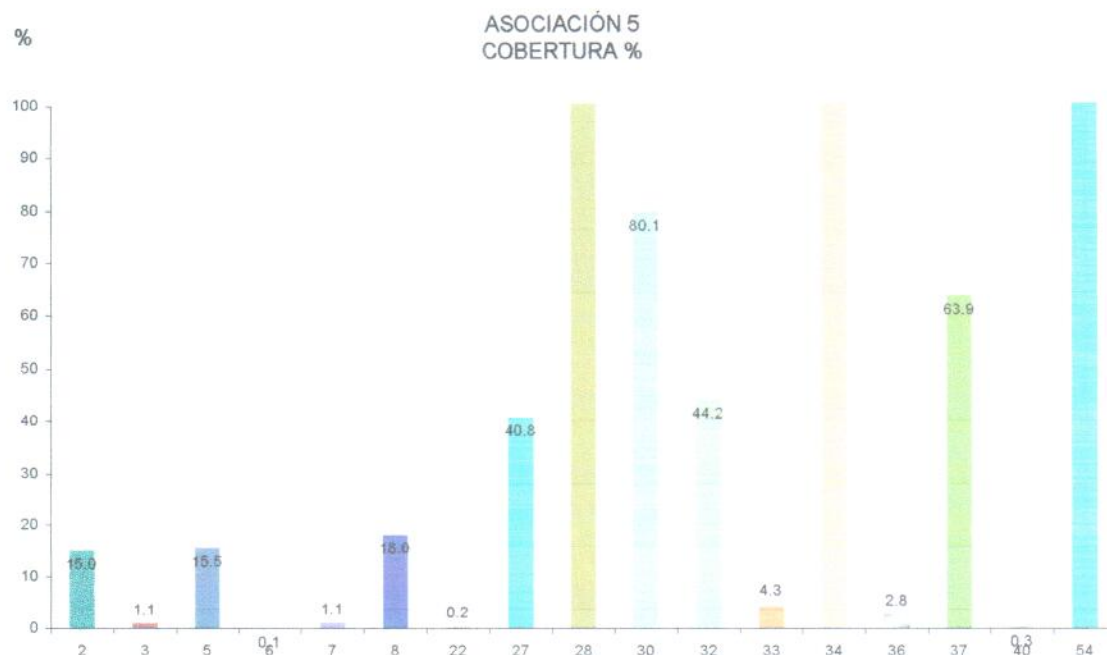


Figura 54. Cobertura de la asociación 5. 2 *Ageratum corymbosum* Zucc., 3 *Eleusine indica* (L.) Gaerth, 5 *Cyperus articulatus* L., 6 *Eliocharis cf yacorensis* E. Roalson, 7 *Echinochloa walteri* (Pursh) Heller., 8 *Pontederia sagittata* C. Presl, 27 *Trichilia havanensis* Jacq., 28 *Cecropia obtusifolia* Bertol, 30 *Panicum elephantipes* Nees ext Trin, 32 *Citharexylum hexangulare* Greenman, 33 *Malvaviscus arboreus* Cav., 34 *Muntingia calabura*, 36 *Solanum rudepanum* Dunal., 37 *Citharexylum ellipticum* Sessé Moc., 40 *Cissus sycioides* L., 54 *Ceiba pentandra*.

4.3. Análisis químico del sustrato contaminado por hidrocarburos

Los resultados correspondientes al análisis del sustrato fueron determinados en el Laboratorio de Análisis Químico del Departamento de Suelos y muestran las concentraciones de cada uno de los nutrientes esenciales (macronutrientes y micronutrientes) que fueron determinados mediante el análisis en el laboratorio y enseguida se analizó cada uno por separado.

Cuadro 29. Concentrado de análisis químicos del sustrato en el pantano de Santa Alejandrina

ASOCIACIÓN	MO %	pH	CE d Sm ⁻¹	N mgkg ⁻¹	P mgkg ⁻¹	K Cmol(+)kg ⁻¹	Ca Cmol(+)kg ⁻¹	Mg Cmol(+)kg ⁻¹	Na Cmol(+)kg ⁻¹	Cu mgkg ⁻¹	Fe mgkg ⁻¹	Mn mgkg ⁻¹	Zinc mgkg ⁻¹
PROMEDIO													
1	8.0	2.6	8.0	241.1	8.30	24.7	1973.7	2599.4	86.40	1.6	644.3	76.4	98.9
2	9.2	3.3	7.6	108.5	7.50	29.0	1655.3	2542.9	124.5	2.2	566.2	79.8	79.1
3	8.0	4.2	3.0	98.7	21.0	56.7	878.60	1202.5	71.60	5.5	511.5	85.0	33.8
4	1.3	6.3	0.5	56.0	7.40	36.1	1197.1	1327.0	17.90	4.4	178.4	53.5	13.4
5	0.7	7.0	1.4	36.3	10.3	23.3	1274.5	1410.5	26.90	1.2	135.3	20.4	4.30
TEST	0.3	3.8	1.1	42.0	3.80	12.8	737.50	653.40	18.20	4.3	149.3	35.5	4.30
CONT	2.7	3.0	0.4	38.5	0.40	3.60	0	0	3.80	0.2	49.80	8.50	1.80

4.3.1. Propiedades físicas

4.3.1.1. Materia Orgánica

Ortiz (1999), señala que se ha correlacionado positivamente la MO con la adsorción de compuestos orgánicos en numerosos estudios, aunque la muestra del hidrocarburo no tiene contenido de materia orgánica. Para análisis de hidrocarburos se requiere se modifique la determinación química de la MO. La adsorción es afectada por dos factores: la hidrofobicidad del contaminante (es la dificultad para disolverse en agua) y la fracción de la materia orgánica en el suelo (contenido de carbono orgánico). Muchos de los compuestos hidrofóbicos pueden ser altamente adsorbidos de acuerdo a varios estudios de campo (Mackay *et al.*, 1985).

Cuadro 30. Clasificación de materia orgánica del sustrato en el pantano de Santa Alejandrina

Asociación	MO %	Clasificación*
1	8	Muy alto
2	9.2	Muy alto
3	8	Muy alto
4	1.3	Bajo
5	0.7	Bajo
Suelo totalmente contaminado	2.7	Medio

*NOM-021-RECNAT-200

La determinación de MO, se considera sobre estimada debido a los compuestos orgánicos que se encuentran en la conformación de los hidrocarburos. Sin embargo, la MO en las primeras asociaciones forma una capa que separa al contaminante de los

hidrocarburos del petróleo, característica por la cual es posible la colonización de nuevas especies.

4.3.1.2 Condiciones limitantes

pH

En el Cuadro 31, se muestra como varía la disponibilidad de nutrientes de acuerdo al pH, nótese que la presencia de algunos elementos esenciales se disminuyen en las asociaciones 1, 2 y 3, debido a que el pH oscila de 2.6 a 4.2 y se incrementa en las siguientes asociaciones (4 y 5) a un pH fuertemente ácido a neutro.

El pH, indica que la disponibilidad de nutrientes es muy favorable en las últimas asociaciones fomentando que la diversidad de especies y los estratos se observen claramente diferenciados. En comparación con la muestra de contaminantes de hidrocarburos del petróleo, las especies de las asociaciones 1 y 2 son plantas muy adaptables a estos niveles de pH.

Cuadro 31. Clasificación de pH de las muestras colectadas en el pantano de Santa Alejandrina

Asociación	pH	Clasificación*
Desechos de hidrocarburo	3	Fuertemente ácido
1	2.6	Fuertemente ácido
2	3.3	Fuertemente ácido
3	4.2	Fuertemente ácido
4	6.3	Moderadamente ácido
5	7.0	Neutro

*NOM-021-RECNAT-200

4.3.1.3. Profundidad del suelo

En este sitio se detectó que no existen capas de suelo mineral conformado como en otros estudios, como el tipo de suelo es fangoso inmerso en un humedal y en este estudio identificado como pantano, debido a que aún en México no existe una clasificación adecuada para los humedales. El comportamiento del contaminante de hidrocarburos del petróleo se distribuye hacia lo profundo del humedal como superficialmente, en el área acuática del humedal el contaminante de hidrocarburos permanece en forma de una

capa, a medida que disminuye el nivel freático el contaminante de hidrocarburos invade el suelo. En las últimas asociaciones vegetales el contaminante de hidrocarburos del petróleo se mezcla con el suelo con características arcillo-arenosas, debido a que el pantano colinda con el Río Coatzacoalcos. La profundidad del suelo en este estudio fue determinada en gran medida a la cobertura que genera la vegetación muerta.

Cuadro 32. Profundidad del suelo de las muestras colectadas en el pantano de Santa Alejandrina

Asociación	Profundidad del suelo cm*
1	3.0
2	0.7
3	6.0
4	3.8
5	5.0

*NOM-021-RECNAT-200

Las asociaciones tienen una capa de materia orgánica, residuo de las plantas acuáticas. En la asociación 2, la característica principal es que el sustrato se incendia, lo cual disminuye la capa de materia orgánica.

4.3.1.4. Salinidad

En el Cuadro 33 se muestran los valores de la conductividad eléctrica (CE) de las muestras del contaminante de hidrocarburos del petróleo, los valores encontrados indican que la salinidad es muy alta en las primeras asociaciones y gradualmente va disminuyendo en las siguientes asociaciones vegetales. El contenido de hidrocarburos dentro de las muestras indica que el comportamiento del pH es fuertemente ácido, en suelos minerales cuando el pH es ácido la salinidad por lo general es muy baja, sin embargo, este análisis muestra lo contrario, caracterizando a los sustratos de hidrocarburos del petróleo con una diferencia significativa.

Cuadro 33. Determinación CE del sustrato en el pantano de Santa Alejandrina

Asociación	Conductividad eléctrica dS m ⁻¹	Clasificación*
1	8.0	Salino
2	7.6	Salino
3	3.0	Moderadamente salino
4	0.5	Efecto despreciable de salinidad
5	1.4	Muy ligeramente salino

*NOM-021-RECNAT-200

4.3.2. Características químicas

4.3.2.1. Elementos primarios N, P y K

Nitrógeno inorgánico

La determinación de nitrógeno inorgánico (NI), indicó que su disponibilidad es muy elevada, pero como el pH, en las primeras asociaciones del área de estudio, la acidez es muy elevada inhibió este elemento.

Conforme avanzan los bloques de las asociaciones en general el contenido de nitrógeno se mantiene en un gradiente elevado.

Cuadro 34. Clasificación de NI de las muestras colectadas en el pantano de Santa Alejandrina

Asociación	N mg Kg ⁻¹	Clasificación*
1	241.1	Muy alto
2	108.5	Muy alto
3	98.7	Muy alto
4	56.0	Alto
5	36.3	Medio

*NOM-021-RECNAT-200

Fósforo

Los resultados de los análisis de suelos se muestran en el Cuadro 35 que la cantidad de fósforo soluble es la más importante y su absorción por las plantas puede ser limitado debido al pH, teniendo en cuenta estas consideraciones en los sitios existe la suficiente cantidad de fósforo, esto debido a que el pH puede limitar la absorción por las plantas.

Por lo general la cantidad de fósforo soluble es muy pequeña y sin embargo, es la más importante ya que es asimilable por las plantas; de acuerdo con Thompson (1980).

Cuadro 35. Clasificación de P de las muestras colectadas en el pantano de Santa Alejandrina

Asociación	P mg Kg ⁻¹	Clasificación*
1	8.3	Bajo
2	7.5	Bajo
3	21.0	Medio
4	7.4	Bajo
5	10.0	Bajo

*NOM-021-RECNAT-200

Potasio

En el Cuadro 36, se muestran los valores de potasio en el suelo que se obtuvieron en las 5 asociaciones. Con respecto a la NOM-021-RECNAT-2000, las concentraciones de potasio se encuentran bajas en el pantano de Santa Alejandrina. Sin embargo.; Fuentes (1989), menciona que el potasio se encuentra formando parte de los minerales primarios y secundarios, y con el paso del tiempo estos minerales se intemperizan y dejan libres los K⁺, que es la forma como son asimilados por las plantas. Por otro lado menciona que una absorción en exceso de potasio provoca deficiencias en Mg, Ca, Fe y Zn.

Cuadro 36. Clasificación de K de las muestras colectadas en el pantano de Santa Alejandrina

Asociación	K (mg/Kg)	Clasificación*
1	24.7	Bajo
2	29	Bajo
3	56.7	Bajo
4	36.1	Bajo
5	23.3	Bajo

*NOM-021-RECNAT-200

4.3.2.2. Elementos secundarios calcio y magnesio

En el cuadro 37, se muestran los resultados obtenidos mediante el análisis de las muestras, los valores indican que estos elementos se encuentran en cantidades lo suficientemente disponibles para el desarrollo de las plantas.

Cuadro 37. Clasificación de Ca y Mg de las muestras colectadas en el pantano de Santa Alejandrina

Asociación	Ca mg/Kg	Mg mg/kg*
1	1973.0	2599.4
2	1655.0	2542.9
3	878.6	1202.5
4	1197.1	1327.0
5	1274.5	1410.5

*NOM-021-RECNAT-200

Queda limitada la disponibilidad del calcio debido a que las concentraciones de magnesio son muy elevadas.

4.3.2.3. Micronutrientes Fe, Cu, Zn y Mn

Las concentraciones de Fe son significantes en la asociación 1, 2 y 3, lo cual puede afirmarse que son concentraciones tóxicas para las plantas; en cambio en las últimas asociaciones disminuyen.

Las concentraciones de Cu como resultado de los análisis de fertilidad de suelos, indican que hay una mayor concentración en la asociación 3 y 4 en comparación con las restantes asociaciones.

Las mayores concentraciones de Zn se representan en la asociación 1 y 2 y van disminuyendo gradualmente hasta la asociación 5.

Cuadro 38. Cantidad de micronutrientes en las muestras colectadas. Fe, Cu, Zn, Mn

Asociación	Fe	Cu	Zn	Mn*
	mg kg ⁻¹			
1	644.3	1.6	98.9	76.4
2	566.2	2.2	79.1	79.8
3	511.5	5.5	33.8	85
4	178.4	4.4	13.4	53.5
5	135.3	1.2	4.3	20.4

*NOM-021-RECNAT-200

Las concentraciones de manganeso permanecen constantes en la asociación 1 y 2, con un ligero incremento en la asociación 3, sucede al igual que los otros micronutrientes disminuyen en gran proporción en las últimas asociaciones.

Una pequeña cantidad de manganeso es esencial para las plantas, pero por su abundancia resulta tóxico, el manganeso interviene en el desarrollo de la clorofila y en los sistemas enzimáticos vegetales; el manganeso disuelto se desplaza hacia posiciones más húmedas y/o más alcalinas, donde precipitan en partículas pequeñas, endurecidas y de color oscuro llamados nódulos o concreciones (Thompson, 1980).

El Fe, Mn, Mg y Zn, tienen una presencia esencial para la formación del pigmento clorofílico. Forman parte de muchas enzimas.

4.4. Análisis de Agua

Las muestras de agua fueron colectadas en 1, en las orillas del Río Coatzacoalcos y la comunidad de Santa Alejandrina; 2 y 3, en el transecto del embarcadero de Minatitlán hacia la comunidad de Santa Alejandrina; 4 y 5, canal de desagüe de la Refinería Lázaro Cardenas.

Cuadro 39. Análisis de agua

MUESTRAS								
AGUA	Na	K	Ca	Cu	Zn	Fe	Mn	
1	113.71	139.74	1.139	0.004	0.068	0.033	0.034	
2	119.24	147.96	1.139	0.004	0.071	0.033	0.034	
3	112.74	135.17	1.191	0.004	0.074	0.033	0.034	
4	82.10	102.26	1.204	0.004	0.076	0.033	0.034	
5	83.95	105.01	1.217	0.004	0.060	0.033	0.034	

El contenido de Na y K en las muestras del río es mayor con respecto al agua del canal de desagüe, debido a que la salinidad del río Coatzacoalcos es mayor que el agua que se libera por parte de la refinería. Los análisis indican que no hay contenido de metales pesados en el agua.

4.5. Análisis Microbiológico

Conforme a la metodología, se determinó el contenido de humedad en el pantano de Santa Alejandrina, en el cual la asociación 1 presenta un 65% de contenido de humedad, esto es debido a que en esta área se mantiene en forma permanente inundado, variando

el nivel de agua durante todo el año. En el caso de la asociación 2, casi no presenta contenido de humedad, ya que es la asociación en la que el contaminante de hidrocarburos de petróleo está más expuesto al ambiente y se incendia con mayor frecuencia.

Cuadro 40. Concentrado de Análisis microbiológico en el pantano de Santa Alejandrina, Minatitlán

ASOCIACIÓN	Esp	HS	Co2	CT	CM	C V	CA	CMV
PROMEDIO								
1	3.3	50.9	167.9	0.6	0.6	0	0	0
2	2	9.4	272.2	1.3	1.3	0	0	0
3	21.7	28.1	168.7	10.3	12.4	0	0	0.4
4	122.3	15.2	245.7	0	0	0	0	0
5	438.3	15.2	112.1	34.9	22.3	1.9	3.3	8.8
TEST	12	19.1	24.9	.	.	.	.	.
CONT	.	.	88	.	.	.	.	.

Donde: Esp= Esporas, HS= Contenido de Humedad, Co2= Liberación de Co2, CT= Colonización Total micorrízica, CM= Colonización por micelio, CV= Colonización por vesículas, CA= Colonización por arbusculos, CMV= Colonización por micelio y vesículas.

4.5.1. Contenido de Humedad en el sustrato de hidrocarburos del petróleo

La determinación de humedad para el contaminante de hidrocarburos de petróleo, resulto impredecible su determinación debido a sus características propias como es la viscosidad. En este estudio se indica que no hay humedad relativa del hidrocarburo.

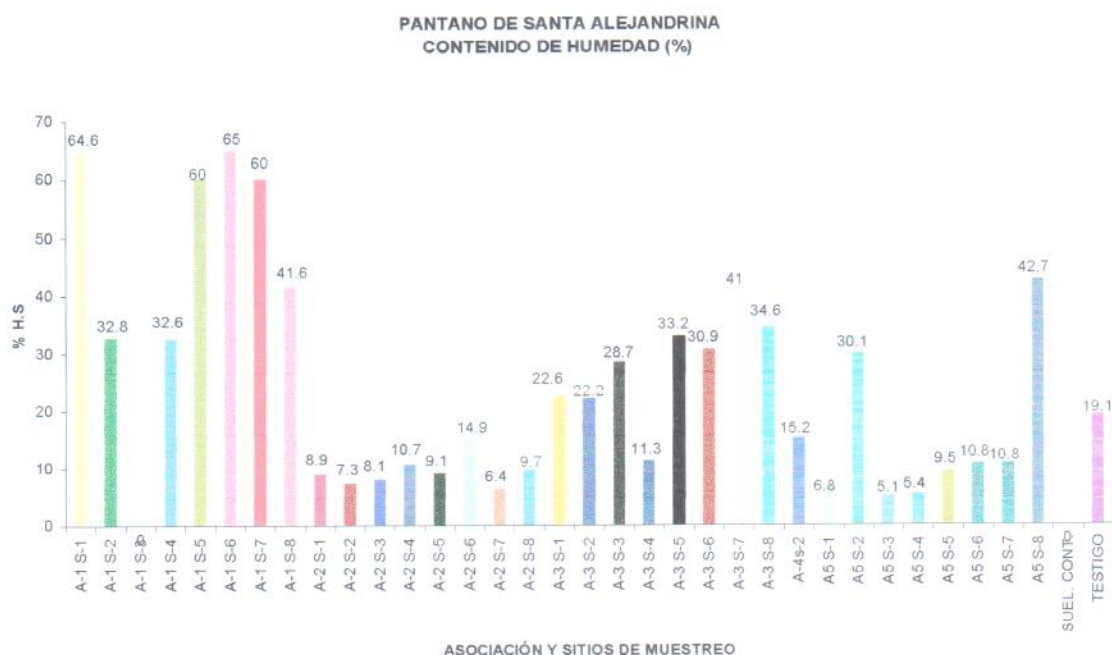


Figura 55. Contenido de humedad por asociación con sus repeticiones. Suelo contaminado por hidrocarburos y testigo.

En la asociación 3, presenta una humedad en general constante y característicamente es la asociación que alberga mayor diversidad de especies. En cambio para la asociación 5 la humedad es muy semejante a la de la asociación 2, aunque el último sitio tiene una humedad muy elevada no es indicador de la asociación.

4.5.2. Determinación de actividad microbiana

La actividad microbiana se calculó mediante la fórmula 1. Las cinco asociaciones vegetales indican un alto valor en este cálculo con respecto al contaminante de hidrocarburos de petróleo. Esta determinación indica que la presencia de vegetación influye directamente en el aumento de la actividad microbiana en el suelo contaminado y disminuye la actividad microbiológica en el contaminante de hidrocarburos de petróleo sin cobertura vegetal. Esta determinación coincide con Zermeño *et al.* (2000).

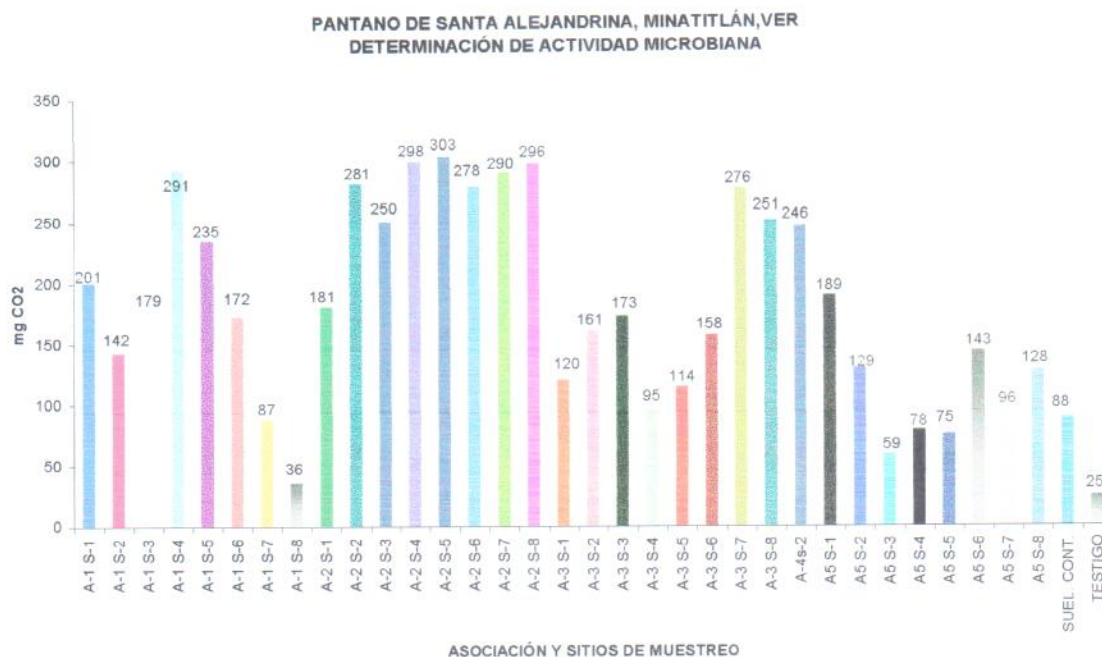


Figura 56. Actividad microbiana en el sustrato de hidrocarburos

4.5.3. Evaluación de la colonización de la micorriza arbuscular

4.5.3.1. Listado de plantas colectadas para el análisis microbiológico.

Se colectó una planta con raíz y sustrato, con la finalidad de contener el mayor número de raíces, ya que para los lavados con KOH y el montaje en el porta objetos, se necesitan de abundantes raíces para ser seleccionadas, las plantas colectadas fueron:

Cuadro 41. Plantas colectadas en el campo

SITIOS	ASOCIACIÓN 1	ASOCIACIÓN 2	ASOCIACIÓN 3	ASOCIACIÓN 4	ASOCIACIÓN 5
1	Rhynchospora holoschoenoides	Cyperus odoratus	Rhynchospora holoschoenoides	*	Cyperus articulatus
2	Echinochloa walteri	Cyperus odoratus	Cyperus surinamensis	Typha domingensis	Citharexylum hexangulare
3	Typha domingensis	Cyperus elegans	Cyperus surinamensis	Panicum elephantipes	Echinochloa walteri
4	Typha domingensis	Cyperus articulatus	Jussiaea peruviana	*	Echinochloa walteri
5	Typha domingensis	Cyperus papyrus	Cyperus lingularis	*	Eleusine indica
6	Typha domingensis	Cyperus papyrus	Cyperus surinamensis	*	Cyperus articulatus
7	Echinochloa walteri	Cyperus elegans	Cyperus lingularis	Panicum elephantipes	Echinochloa walteri
8	Typha domingensis	Ludwigia leptocarpa	Cyperus lingularis	Cyperus odoratus	Solanum rudepanum

* sin registro.

4.5.3.2. Colonización Total micorrícica por asociaciones vegetales

La colonización micorrícica no se presenta en los primeros estratos sucesionales, debido a que la vegetación de mayor abundancia es de la familia de las ciperáceas, esto puede generar que haya una baja tasa de inoculación por parte de las micorrizas arbusculares, (Hacskaylo, 1972), que indica que las micorrizas forman una asociación del 80% de las plantas, excepto de las Crucíferáceas (*Cruciferae*), Quenopodiáceas (*Chenopodiaceae*), Ciperáceas (*Cyperaceae*) y las acuáticas.

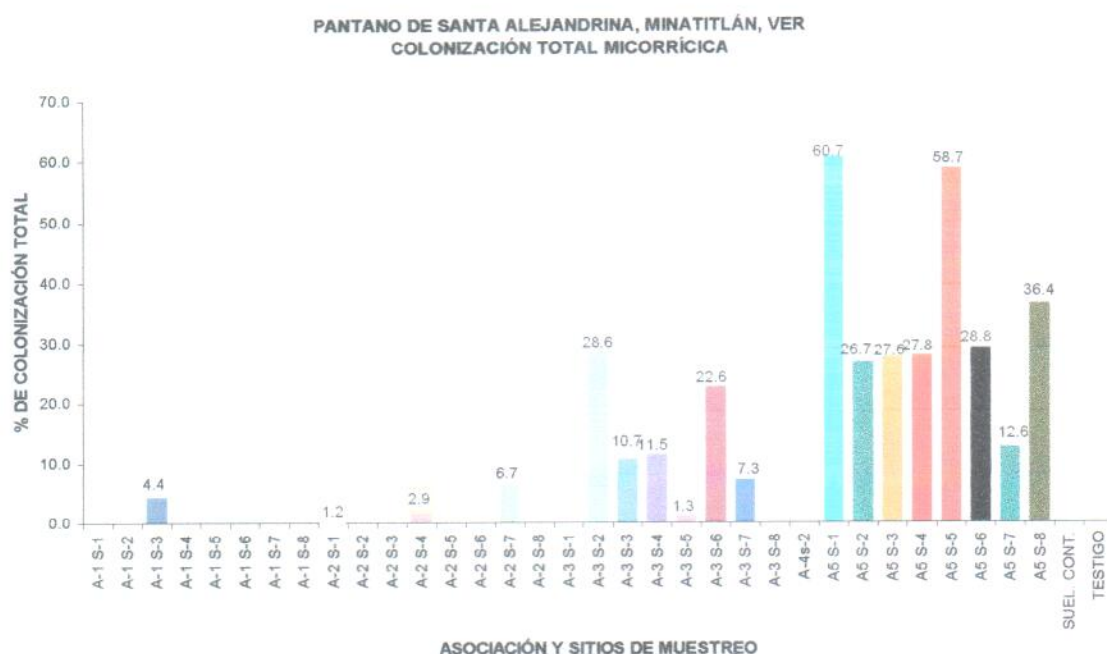


Figura 57. Colonización total micorrícica en las asociaciones

En la asociación cinco es el sitio en donde las micorrizas se desarrollan exitosamente aún cuando el contenido de hidrocarburos está presente, pero no tan compacto como en las asociaciones 1 y 2. Sin embargo, existe la presencia de las micorrizas en las asociaciones restantes en menor proporción.

Como el pH del sustrato se va volviendo más alcalino, favorece la presencia micorríca en las asociaciones, además de los continuos lixiviados de agua por la presencia de los dos ciclos del pantano (sequía e inundación) favorece la dispersión de la micorrización hacia áreas cubiertas por vegetación.

A medida que el hidrocarburo se incorpora al suelo, o bien, se mezcla con las arcillas y arena que deposita el río Coatzacoalcos a las orillas, facilita el desarrollo de la vegetación, incrementa su diversidad y permite el establecimiento de las micorrizas.

En conclusión, a mayor degradación del hidrocarburo, mayor aumento de diversidad y mayor colonización micorrícica.

4.5.3.3. Colonización Vesicular – Micelio por asociaciones en el pantano de Santa Alejandrina

En este estudio se dio mayor énfasis a las estructuras de las micorrizas arbusculares y las vesículas, debido a que el micelio podría confundirse con el de otro tipo de hongos.

La asociación cinco, indica que hay una mayor colonización micorrícica con respecto al resto de las asociaciones vegetales.

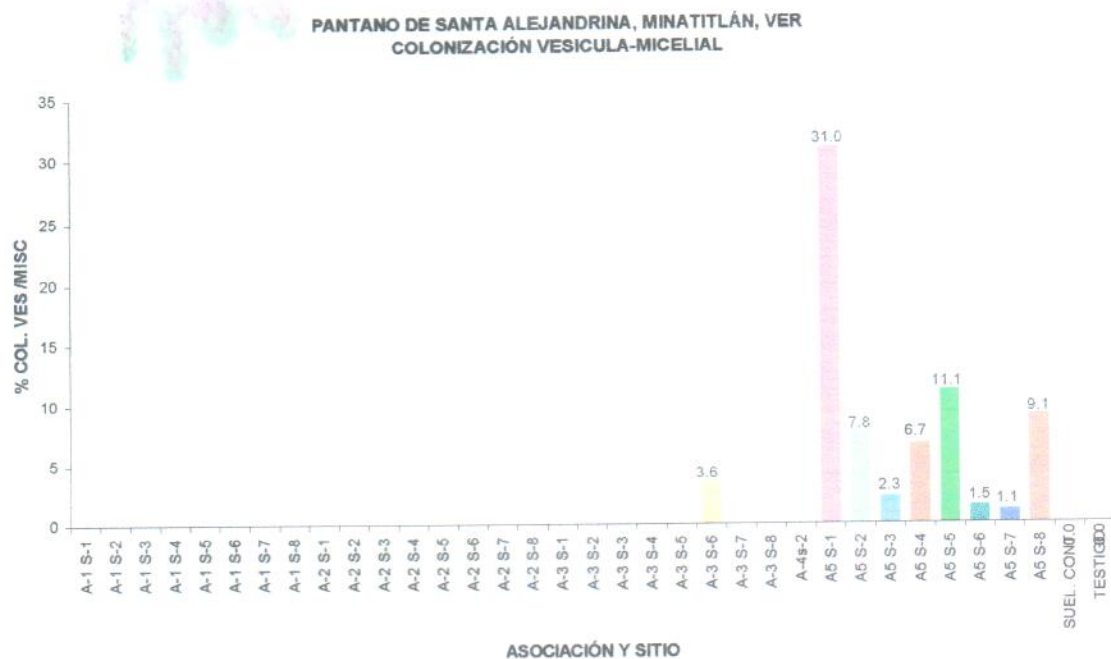


Figura 58. Colonización de vesículas.
Indicador de la presencia de micorrizas en el área de estudio

Sin embargo, el indicador en la asociación 3 es constante en comparación con la colonización total micorrizica. Se considera que el manejo de las raíces previamente a su observación requirió de mayor aclaración, ya que la coloración de las vesículas llegaba a confundirse con restos de hidrocarburos, o bien, podría haberlas cubierto.

A continuación se muestran observaciones al microscopio de las raíces observadas por asociación en el pantano de Santa Alejandrina, Minatitlán, Ver.:

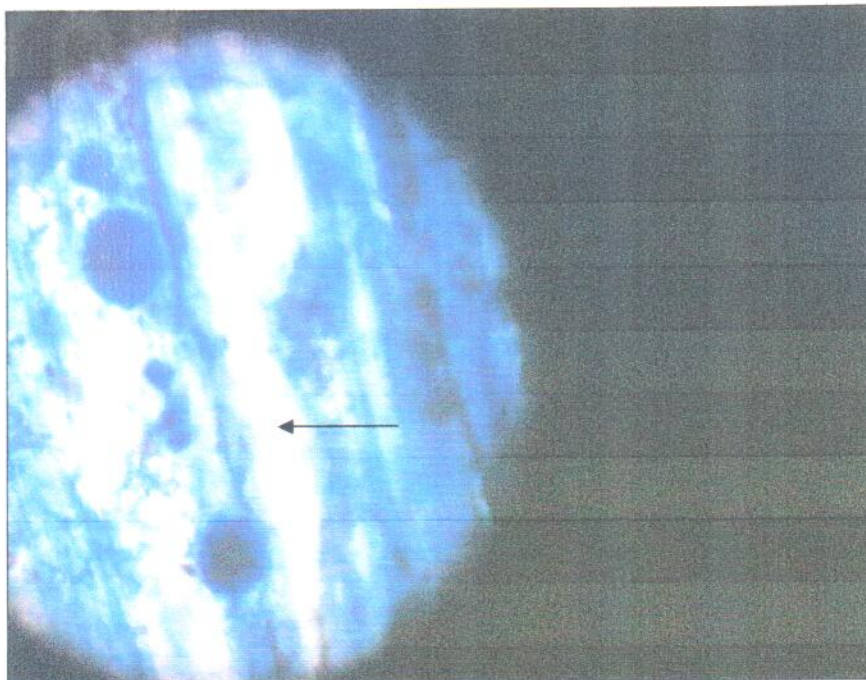


Figura 59. Presencia de vesículas con micelio, zona inferior central.

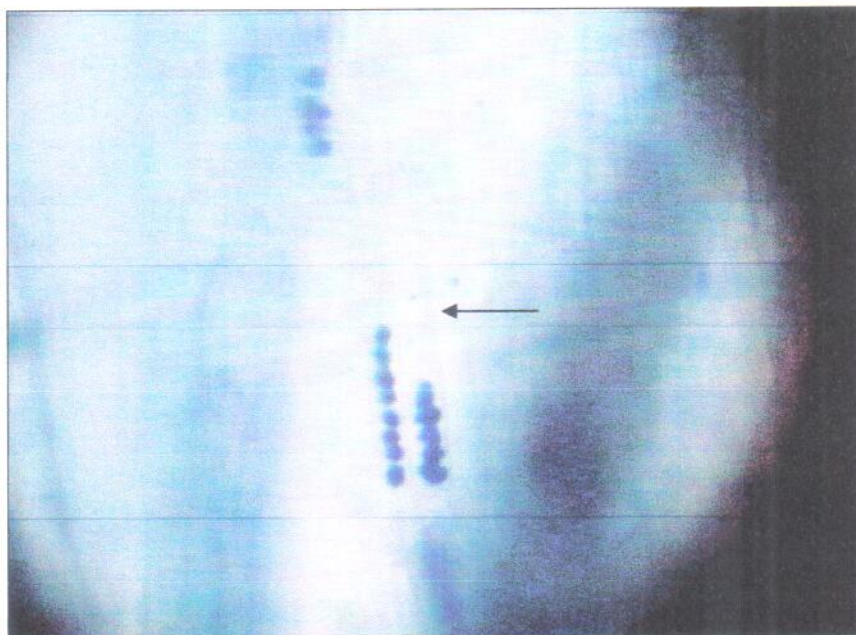


Figura 60. Esporas de *Pithium* pequeñas

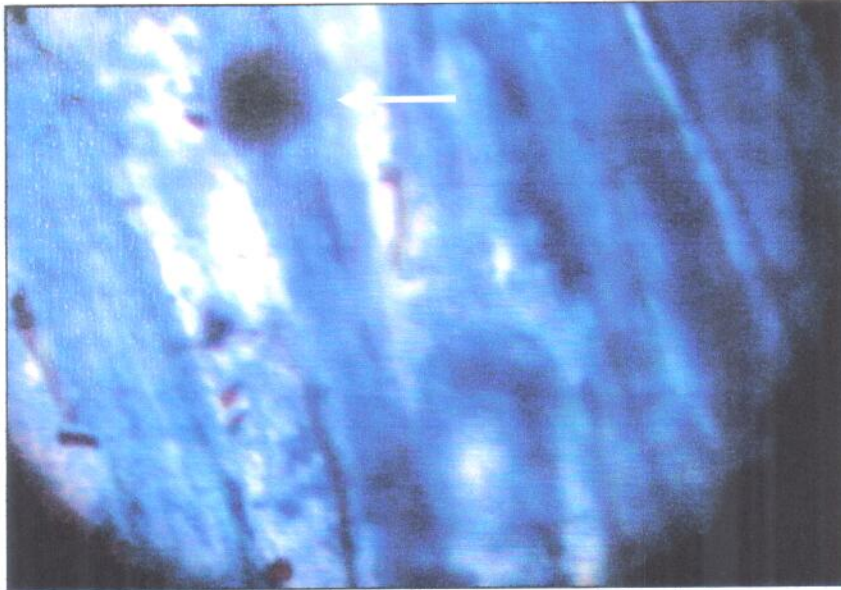


Figura 61. Vesículas con hifas. Parte superior izquierda.

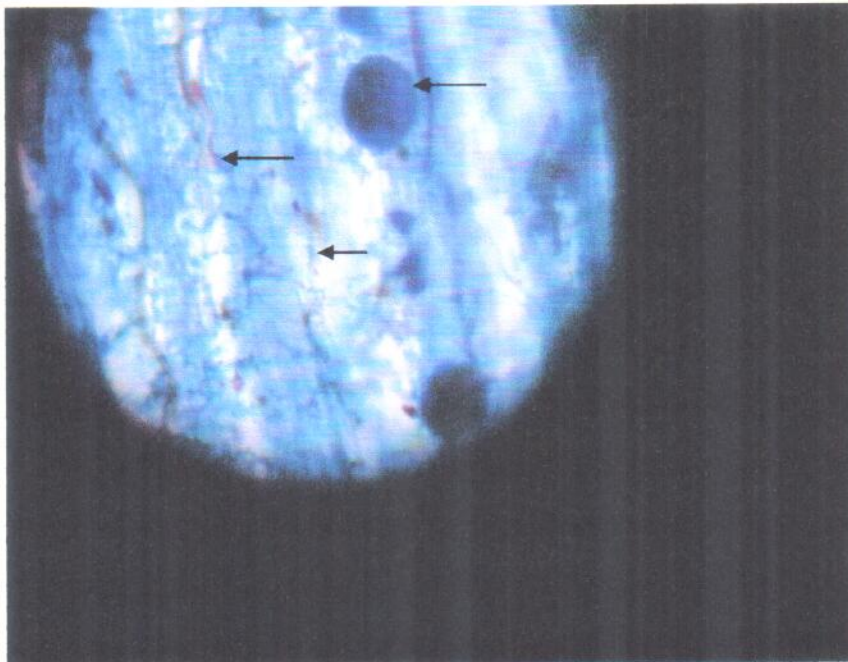


Figura 62. Presencia de arbusculos y micelio.

No se observa claramente el arbusculo en la parte inferior central debido a que la tinción y aclareo debe ser modificado para contaminantes por hidrocarburos.

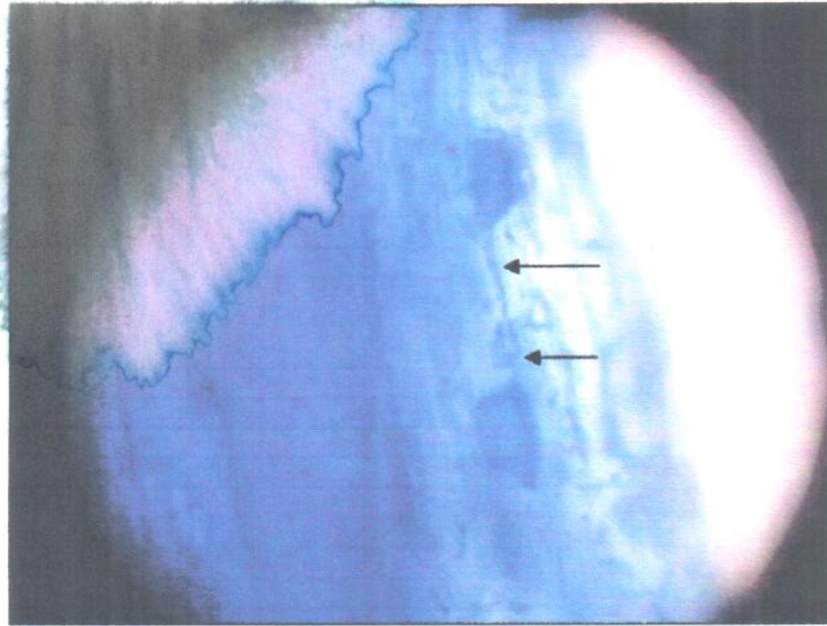


Figura 63. Presencia de arbúsculos con micelio

4.5.3.4. Monitoreo de esporas

Se realizó el conteo de esporas a 500 y 44 micras, encontrándose en mayor abundancia en el primer tamiz, después se utilizaron la fórmula 6 para su cálculo.

En las cinco asociaciones se encontraron esporas, aunque en las primeras asociaciones la presencia de Ciperáceas es abundante, a medida que la sucesión vegetal va cambiando y se desplaza la familia de Ciperáceas por otras familias, la invasión y abundancia de las esporas va incrementando en las siguientes asociaciones.

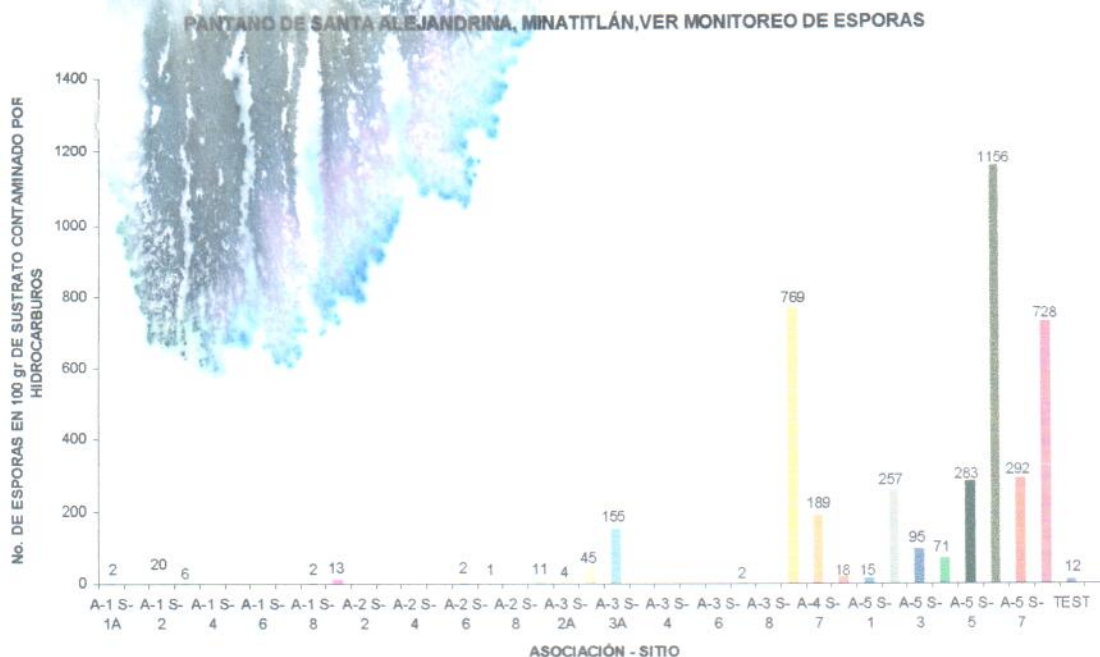


Figura 64. Análisis de esporas de micorrizas

En la asociación 4 y 5 se presenta la mayor abundancia de esporas. Este es un indicador de que el desarrollo y reproducción de las micorrizas VA es determinante en estas asociaciones, favoreciendo en estos estratos sucesionales la adaptación de las micorrizas.

Franco- Ramírez *et al.* (2004), indican que la abundancia y la diversidad de esporas fue mayor en el sitio con menor concentración de hidrocarburos, lo que señala es que a mayor contenido de HTPs se observa una menor presencia de esporas. Este autor identificó las especies de *Glomus aff ambisporum*, *Glomus sinousum*, *Acaulospora aff mellea* y *Archaeospora aff. gerdermanii*.

Álvarez *et al.* (2004), indican que las plántulas requieren micrositos específicos para desarrollarse y que establecen interacciones bióticas específicas que moldean sus atributos de historia de vida y en particular que pueden desarrollar asociaciones mutualistas con la microbiota edáfica, a fin de mejorar la captación de nutrientes y de agua del suelo, en este caso los hongos micorrizógenos arbusculares (HMA) podrían

desempeñar un papel determinante para la diversidad, mantenimiento y productividad de las especies vegetales en los diversos ecosistemas y han contribuido a lo largo de millones de años de coevolución con las plantas a moldear características como estructura, textura y fertilidad del suelo.

Aunque cabe mencionar que las plántulas pioneras en los primeros estados sucesionales, por su estrategia de adaptación no forman asociaciones micorrícicas, lo cual será a partir de los estados sucesionales en la que las estrategias de colonización de las plantas requieran de esta asociación mutualista. Además de considerar el tipo de vegetación nativa que se espera establecer en el siguiente estrato sucesional, considerando a ecosistemas aún conservados como referencia.

De ahí radica la importancia de estudiar el comportamiento de los ecosistemas conservados, ya que son la fuente principal del material biológico para reproducir. Otros estudios han demostrado que es necesario usar inóculo de HMA de zonas conservadas de selva y que las plántulas de especies pioneras y persistentes responden diferencialmente a la micorrización dependiendo de las condiciones microambientales y de competencia, como ocurrió según Álvarez *et al.* (2004), con *Heliocarpus appeniculatus*, especie pionera que tiene alta dependencia micorrícica.

Las especies de plantas no micorrícicas tienen varias adaptaciones para mejorar la asimilación de nutrientes, tales como raíces ramificadas o muchas raíces largas como cabellos (Jasper, 2003).

Para que la revegetación de un ecosistema tenga una buena estabilidad a largo plazo, se requiere de una adecuada cantidad de nutrientes. La disponibilidad de los nutrientes generalmente es alta al tiempo del establecimiento de la revegetación debido a la mineralización en el suelo perturbado y a las aplicaciones de fertilizante, pero podría rápidamente disminuir esta disponibilidad de nutrientes ya que con el paso del tiempo se tiende a dejar de fertilizar, y muchas veces la zona revegetada aún no ha sido capaz de

generar suficiente materia orgánica para hacer sostenible el ciclo de nutrientes en el ecosistema.

Una rápida estabilización de la estructura del suelo después de la perturbación es más probable que sea alcanzado por un crecimiento extensivo de las raíces de plantas micorrícicas porque estas raíces y sus hifas asociadas pueden actuar para unir granos de arena o microagregados del suelo (Tisdall, 1991).

5. PROPUESTA DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA PARA EL PANTANO CONTAMINADO POR HIDROCARBUROS EN SANTA ALEJANDRINA, MINATITLÁN, VER.

Con base al diagnóstico del pantano se realiza la siguiente propuesta de restauración a través de una matriz de restauración ecológica (Figura 65) que consiste básicamente en la regulación de la combustión del hidrocarburo, el enriquecimiento del sustrato con materia orgánica y el establecimiento de plantas nativas adaptadas a las condiciones del pantano.

La propuesta de restauración para el pantano contaminado por hidrocarburos se define a continuación:

1. Quemadas controladas del hidrocarburo, a través de quemadas preescritas el hidrocarburo se carboniza y agrieta, permite con mayor facilidad que la materia orgánica y el agua se retenga, formando un micrositio para la germinación de semillas invasoras e inicie la sucesión ecológica en el pantano.

La actividad microbiológica aumenta y favorece a que el hidrocarburo calcinado se degrade con mayor facilidad.

2. Distribución de una capa de suelo con un espesor de 2 cm, para facilitar que se incremente la invasión de pastos, de esta manera se acortan los tiempos sucesionales. Además, las esporas micorrízicas contenidas en el suelo permiten que se forme una asociación con las plantas propagadas.

La distribución va a ser en dos áreas, la primera para áreas fuera de comunidades y ejidos, su característica principal es que son áreas fangosas, muy difíciles de acceder, para agregar el suelo se sugiere como medio de transporte utilizar avionetas o algún otro medio para estas condiciones. La segunda, para las áreas que colinden con cuerpos de agua y áreas que queden dentro de las comunidades y ejidos donde la mano de obra y el acceso a las áreas impactadas es más fácil, colocar el suelo o materia orgánica en costales y agregar semillas de las plantas colonizadoras.

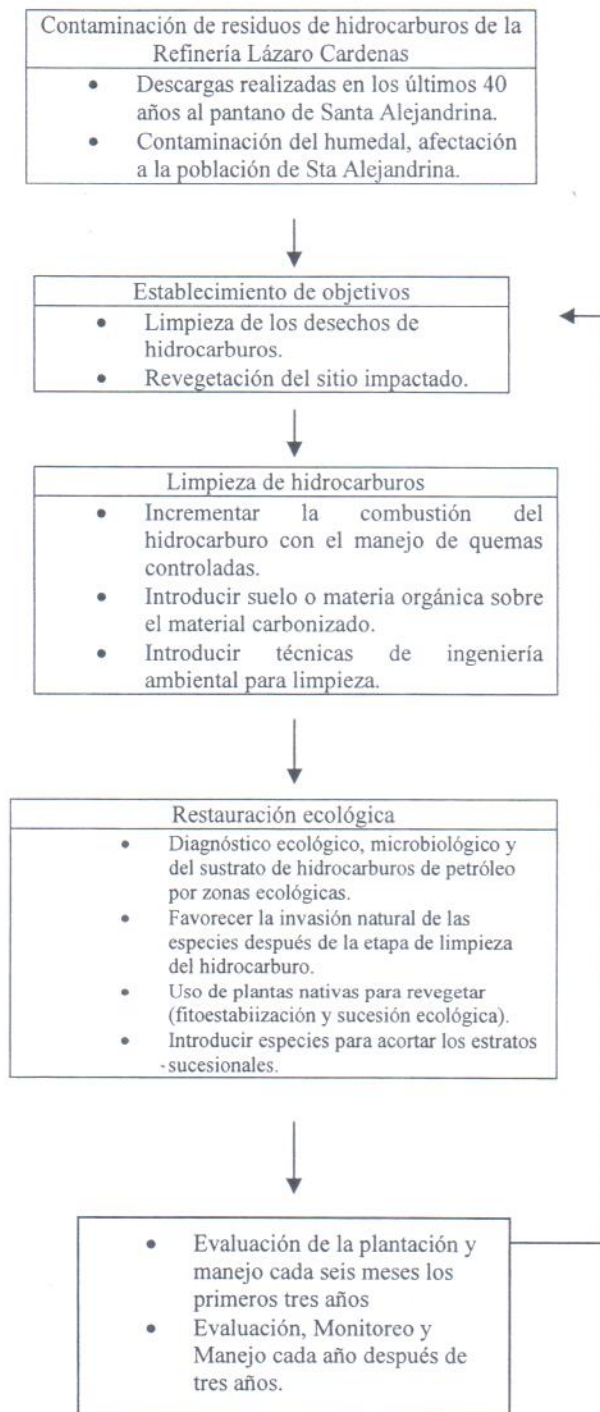


Figura 65. Matriz de restauración ecológica activa

Potenciar la dinámica natural del humedal (sequía-inundación), la colonización natural de las plantas invasoras en la primera fase de colonización es de pastos principalmente y de plantas acuáticas que invaden el área cuando se inunda el pantano en época de lluvias, estas plantas son ricas en materia orgánica cuando se incorporan al suelo, generando una nueva opción para la invasión de otras especies de hierbas y posteriormente de arbustos.

3. Restauración ecológica del pantano, mediante la introducción o fomento de especies que se encuentran normalmente en asociaciones más avanzadas, se han identificado las plantas con mayor frecuencia en cada asociación y que pueden ser utilizadas en asociaciones sucesionales anteriores dado que se encuentran en ellas, pero con menor frecuencia relativa. Propagarlas en la sucesión anterior y acortar el tiempo de recuperación del humedal.

Ceiba pentandra, *Muntingia calabura*, *Cecropia obtusifolia*, son plantas nativas del pantano de Santa Alejandrina, además son catalogadas como potencialmente valiosas para la restauración ecológica. *Enterolobium cyclocarpum*, *Pithecellobium dulce*, *Inga vera*, *Metopium brownie*, es vegetación riparia catalogada como especies propias para restauración, aunque no se encontraron en el pantano, se sugiere probarlas para su establecimiento en la asociación cuatro y cinco.

El establecimiento de las plántulas en el campo es un paso crítico para la reforestación y/o diseño de plantaciones, la simbiosis con hongos micorrícicos V-A en las raíces de las plantas en las asociaciones cuatro y cinco, aumenta las probabilidades de éxito en el establecimiento y el crecimiento de plántulas introducidas al campo, por ello se propone enriquecer con micorrizas las asociaciones dos y tres.

Las especies de mayor abundancia en el pantano de Santa Alejandrina son *Typha domingensis*, *Eleusine indica*, *Polygonum punctatum*, *Heliconia latispatha* y *Panicum elephantipes*. Estas plantas en las cinco asociaciones se presentan ya sea como

dominantes o como especies suprimidas, por lo que se sugiere fomentar su establecimiento en las asociaciones uno, dos y tres.

El porcentaje más alto de las plantas que crecen en la asociación uno son *Rhynchospora holoschoenoides* (22 %), *Ageratum corymbosum* (17%), *Eleusine indica* (11%), *Typha domingensis* (13%) y *Cyperus articulatus* (9%), en la asociación dos *Rhynchospora holoschoenoides*, *Ageratum corymbosum* y *Typha domingensis* no son especies abundantes ya que no aparecen en esta asociación. Aunque en la asociación tres reaparecen con una menor población como es el caso de *Typha* y *Rhynchospora*, esta última desaparece y *Typha* aún tiene una distribución sucesional en la asociación cuatro y desaparece (Cuadro 43).

Eleusine indica, es una especie abundante en la asociación uno, pero en la asociación dos, disminuye su población, en cambio con *Cyperus articulatus* es una especie dominante en ambas asociaciones.

Cuadro 42. Frecuencia relativa por asociación vegetal en el pantano de Santa Alejandrina

ASOCIACIÓN 1	%	ASOCIACIÓN 2	%	ASOCIACIÓN 3	%	ASOCIACIÓN 4	%	ASOCIACIÓN 5	%
Rhynchospora	22	Cyperus elegans	19	Polygonum	43	Panicum elephantipes	40	Citharexylum	15
holoschoenoides		Cyperus odoratus	15	punctatum	8	Heliconia latispatha	27	ellipticum	10
Ageratum	17	Cyperus	11	Cyperus elegans	11	Jussiaea peruviana	7	Muntingia calabura	9
corymbosum	11	surinamensis		Cyperus lingularis	7	Hydrocotyle	6	Eleusine indica	9
Eleusine indica	13	Brickellia pacyensis	11	Cyperus	7	bonariensis	6	Cyperus articulatus	8
Typha domingensis	9	Ludwigia leptocarpa	9	surinamensis	5	Pontederia sagittata	4	Citharexylum	8
Cyperus articulatus	6	Cyperus artioulatus	9	Echinochloa walteri		Typha domingensis	4	ellipticum	8
Hydrocotyle		Cyperus papyrus	7	Rhynchospora	4	Trichilia havanensis	3	Cissus sycioides	7
bonariensis	6	Cyperus lingularis	5	holoschoenoides		Cecropia obtusifolia	3	Malvaviscus arboreus	
Echinochloa walteri	5	Echinochloa	5	Hydrocotyle	4	Lantana hispida	1	Citharexylum	6
Eclipta prostrata	3	cololum	3	bonariensis	4	Piper tuberculatum	1	hexangulare	5
Polygonum punctatum	3	Eleusine indica	3	Typha domingensis	3	Citharexylum		Echinochloa walteri	3
Ludwigia octovalvis	3	Polygonum	1	Cyperus giganteus	3	hexangulare	1	Cecropia obtusifolia	2
Cyperus surinamensis	3	punctatum	1	Eragrostis prolifera	3	Cyperus odoratus		Trichilia havanensis	1
Heliconia latispatha	2	Jussiaea peruviana		Echinochloa				Ceiba pentandra	
Piper tuberculatum		Avicennia		cololum				Eliocharis cf	
		germinans		Jussiaea peruviana				yacorensis	

Las plantas dominantes de la asociación 2 en su mayoría son *Cyperus elegans* (19%), *Cyperus odoratus* (15 %), *Cyperus surinamensis* (11 %), *Brickellia pacyensis* (11 %), *Ludwigia leptocarpa* (9 %), *Cyperus articulatus* (9 %), en cambio en la asociación tres y cuatro, las ciperáceas disminuyen su población significativamente así como la diversidad de especies del género.

El pasto *Panicum elephantipes* (40%) y *Heliconia latispatha* (27 %), son las especies dominantes de la asociación cuatro, el pasto indica que tiene una distribución muy específica ya que en ninguna otra asociación vegetal se presenta, en cambio *Heliconia latispatha*, se presenta en la asociación uno con muy baja densidad. Con los datos consignados en el Cuadro 1 y el análisis realizado con anterioridad se sugiere fomentar el establecimiento de las especies por asociación en el Cuadro 2; con lo cual se reducirá el tiempo de recuperación del humedal.

Cuadro 43. Especies para la restauración ecológica en el pantano de Santa Alejandrina, Ver.

ASOCIACIÓN 1	ASOCIACIÓN 2	ASOCIACIÓN 3	ASOCIACIÓN 4	ASOCIACIÓN 5
<u>Acuática no enraizada</u>	<u>Pastos</u>	<u>Pastos</u>	<u>Pastos</u>	<u>Pastos</u>
<i>Lemna</i>	<i>Cyperus lingularis</i>	<i>Panicum elephantipes</i>	<i>Panicum elephantipes</i>	<i>Cyperus articulatus</i>
<u>Acuáticas enraizadas y flotantes</u>	<i>Cyperus giganteus</i>	<i>Lantana hispida</i>	<i>Cyperus articulatus</i>	<i>Eleusine indica</i>
<i>Nymphaea elegans</i> ,	<i>Echinochloa walteri</i>	<u>Rastreras</u>	<i>Eleusine indica</i>	<u>Hierbas</u>
<i>Nymphaea fallax</i> ,	<u>Rastreras</u>	<i>Hydrocotyle bonariensis</i>	<i>Echinochloa walteri</i>	<i>Heliconia latispatha</i>
<u>Acuáticas enraizadas emergentes</u>	<i>Hydrocotyle bonariensis</i>	<u>Hierbas</u>	<u>Hierbas</u>	<i>Brickellia pacyensis</i>
<i>Pontederia sagittata</i>	<i>Ipomea trichocarpa</i>	<i>Heliconia latispatha</i>	<i>Heliconia latispatha</i>	<i>Eclipta prostrata</i>
<i>Typha domingensis</i>	<i>Bonamia cf. sulphurea</i>	<i>Jussiaea peruviana</i>	<i>Sesbania herbacea</i>	<i>Sesbania herbacea</i>
<u>Pastos</u>	<u>Hierbas</u>	<u>Acuática enraizadas emergentes</u>	<u>Acuáticas enraizadas emergentes</u>	<u>Acuáticas enraizadas emergentes</u>
<i>Cyperus elegans</i>	<i>Polygonum punctatum</i>	<i>Pontederia sagittata</i>	<i>Pontederia sagittata</i>	<i>Pontederia sagittata</i>
<i>Cyperus odoratus</i>	<i>Jussiaea peruviana</i>	<u>Arbustos</u>	<i>Eliocharis cf. yacorensis</i>	<i>Eliocharis cf. yacorensis</i>
<i>Cyperus surinamensis</i>	<i>Heliotropium</i>	<i>Piper tuberculatum</i>	<u>Arbustos</u>	<u>Arbustos</u>
<i>Cyperus papyrus</i>	<i>macrostachyum.</i>		<i>Malvaviscus arboreus</i>	<i>Malvaviscus arboreus</i>
<i>Echinochloa colonum</i>	<i>Brickellia pacyensis</i>		<i>Aeschynomene sensitiva</i>	<i>Aeschynomene sensitiva</i>
	<i>Eclipta prostrata</i>		<i>Piper tuberculatum</i>	<i>Piper tuberculatum</i>
			<u>Árboles</u>	<u>Árboles</u>
			<i>Cecropia obtusifolia</i>	<i>Cecropia obtusifolia</i>
			<i>Citharexylum hexangulare</i>	<i>Citharexylum hexangulare</i>
			<i>Citharexylum ellipticum</i>	<i>Citharexylum ellipticum</i>
			<i>Muntigia calabura.</i>	<i>Muntigia calabura.</i>
			<i>Trichilia havanensis</i>	<i>Trichilia havanensis</i>
			<i>Ceiba pentandra</i>	<i>Ceiba pentandra</i>
				<i>Enterolobium cyclocarpum</i>
				<i>Pithecellobium dulce</i>
				<i>Inga vera</i>
				<i>Metopium brownie</i>

En la asociación uno, se recomienda propagar las plantas acuáticas: *Nymphaea elegans*, *Nymphaea fallax*, *Lemna*, *Pontederia sagittata* y *Typha domingensis*, ya que cuando mueren forman parte de la materia orgánica que se acumula sobre el sustrato. Por sus formas de vida hay acuáticas enraizadas y no enraizadas, realizar redes para la plantación con material reciclable (madera, alambre, etc.) con la finalidad de que las

plantas tengan mayor facilidad de enraizamiento en las primeras etapas de su crecimiento.

Se sugiere introducir las especies en la asociación uno: *Cyperus elegans*, *Cyperus odoratus*, *Cyperus surinamensis*, *Cyperus papyrus* y *Echinochloa colonum* que se identificaron en la asociación dos; con el objetivo de aumentar la diversidad de pastos debido a que es la vegetación que mejor se adapta a los desechos de la refinería.

En la asociación dos, introducir los pastos *Cyperus lingularis*, *Cyperus giganteus* y *Echinochloa walteri* en las áreas que los desechos de hidrocarburos no se han carbonizado o porque son residuos recientemente depositados.

En áreas cubiertas con materia orgánica, propagar las plantas rastreras: *Hydrocotyle bonariensis*, *Ipomea trichocarpa* y *Bonamia cf. sulphurea*. Los pastos son suprimidos por las hierbas, debido a que las condiciones del sustrato son más adecuadas. Se sugieren las especies siguientes: *Polygonum punctatum*, *Jussiaea peruviana*, *Heliotropium macrostachyum*, *Brikellia pacyensis*, *Eclipta prostrata*, porque en su frecuencia relativa en la asociación tres aumenta, esto favorece a reducir el tiempo sucesional.

En la asociación tres, fomentar los pastos: *Panicum elephantipes* *Pontederia sagittata* y *Lantana hispida*, para las áreas fangosas. En esta asociación el hidrocarburo se comienza a incorporar con el suelo natural que es arrastrado por la corriente del humedal y por la materia orgánica acumulada, lo cual va a permitir que se puedan introducir y aumentar en su población hierbas y arbustos: *Heliconia latispatha*, *Jussiaea peruviana* y *Piper tuberculatum*.

La presencia de pastos indica que todavía existen áreas en las que el hidrocarburo aún no es asimilable por otras especies.

Para la asociación cuatro incrementar la población de *Panicum elephantipes* ya que es la especie que mejor se adapta en la época de lluvias al sustrato fangoso y al morir deja abundante materia orgánica la cual permite incrementar la población de *Cyperus articulatus*, *Eleusine indica*, *Echinochloa walteri*, *Heliconia latispatha*, *Pontederia sagittata* y *Piper tuberculatum*, *Eliocharis cf yacorensis*, *Malvaviscus arboreus* y *Aeschynomene sensitiva*.

A partir de esta asociación se incluye el estrato arbóreo con las siguientes especies: *Trichilia havanensis*, *Cecropia obtusifolia* y *Citharexylum hexangulare*, porque pueden soportar la inundación por la época de lluvias, e introducir *Citharexylum ellipticum*, *Muntigia calabura*, *Trichilia havanensis* y *Ceiba pentandra* en zonas con menor posibilidad de inundación.

En la asociación cinco, las hierbas, arbustos y árboles ya fueron introducidas en la asociación anterior, por lo cual es favorable establecer parcelas para la propagación de las especies arbóreas de las especies: *Enterolobium cyclocarpum*, *Pithecellobium dulce*, *Inga vera* y *Metopium brownie* que no se encontraron en el pantano, pero pueden ser adaptadas a este medio.

Las especies elegidas se han adaptado al sustrato de hidrocarburos y a la dinámica natural del pantano; aunque también tienen usos que la comunidad de Santa Alejandrina puede utilizar para enriquecer sus recursos naturales y económicos. Cabe mencionar que el uso medicinal no se recomienda porque no se han realizado estudios de las plantas puedan contener tóxicos del sustrato de hidrocarburos y puedan ocasionar lesiones al ingerirse a las personas o animales. Establecidas las plantaciones se sugiere realizar un monitoreo cada seis meses durante tres años y posteriormente realizar una evaluación anual.

6. CONCLUSIONES

1. Los procesos naturales del pantano de Santa Alejandrina están determinados por la dinámica del humedal: Inundación y sequía. Existen dos grandes grupos de vegetación: vegetación acuática y vegetación terrestre. Se determinaron formas de vida adecuadas para pantanos: Mesofanerofitos (árboles de 5-50 m), Nanofanerofitos (arbustos menores de 2m), Hemicriptofitas (hierbas), Hemicriptofitos reptantes (rastreras), Hemicriptofitos cespitosos (pastos), Hydrofitos errantes (acuáticas no enraizadas), Hydrofitos enraizados de hojas flotantes (acuáticas enraizadas y flotantes), Hydrofitos enraizado emergente (acuáticas enraizadas emergentes), Hydrofitos enraizados sumergidos
2. Por sus formas de vida con 23 ejemplares de un total de 52 especies identificadas son de hemicriptofitos cespitosos (pastos) e hydrofitos enraizados emergentes (acuáticas enraizadas emergentes) e hydrofitos enraizados de hojas flotantes (acuáticas enraizadas y flotantes). Siendo estas las plantas de mayor abundancia y mejor adaptadas al ecosistema perturbado.
3. Las especies más agresivas o pioneras en el humedal, pertenecen a las familias: Nymphaeaceae, Leguminosae y Asteraceae; Typhaceae; Cyperaceae y Polygonaceae las cuales permiten que se estimule la dinámica sucesional. En ese orden se encontraron en un 6, 8 y 18 % respectivamente.
4. Las estrategias de colonización de las plantas nativas encontradas en el pantano son a través de la dispersión de abundantes semillas, las plantas acuáticas por rizomas, las rastreras por estolones y las leñosas por semilla y rebrote.
5. Las plantas del pantano de Santa Alejandrina, tienen la capacidad de adaptación al medio contaminado por hidrocarburos en todos sus estados sucesionales. Debido a que en las cinco asociaciones vegetales se encontraron especies que permitieron el establecimiento de la siguiente sucesión ecológica permitiendo la diversidad de especies aún con el hidrocarburo del petróleo.
6. La dinámica propia de la degradación de los hidrocarburos del petróleo permiten el medio para la colonización y sucesión de las especies. Las especies de mayor abundancia en el pantano de Santa Alejandrina son: *Hydrocotyle bonariensis* Lam.,

Heliconia latispatha Bentham, *Polygonum punctatum* Ell., *Panicum elephantipes*, *Nymphaea elegans* Hooker, *Nymphaea fallax* Ornduff, *Typha domingensis* Pers con un porcentaje con respecto del total de especies encontradas de 52, 52, 65, 78, 80, 80 y 95% respectivamente.

7. El lirio acuático (*Eichhornia crassipes* (C. Martius), lemna (*Lemna* spp.) y tipa (*Typha domingensis* Pers.) actúan mediante dos procesos de fitorremediación: fitoextractoras y fitoestabilizadoras.
8. El pH es fuertemente ácido en las primeras tres asociaciones al igual en las concentraciones de Fe. El calcio queda inhibido por las elevadas concentraciones de magnesio. El nitrógeno, fósforo y potasio, nutrientes indispensables para las plantas se vuelven más disponibles en las últimas asociaciones, es directamente proporcional a la diversidad y al estrato forestal que se desarrolla.
9. La actividad microbiana es mayor en el pantano contaminado por hidrocarburos con presencia de plantas que en áreas desprovistas de la misma, esto indica que las plantas intervienen en el proceso de fitoestabilización.
10. La presencia de asociación micorrícica con las plantas del pantano aumenta a medida que el hidrocarburo es degradado y mezclado con el suelo original y aumenta la diversidad de especies.
11. Hay presencia de micorrizas en el sustrato contaminado por hidrocarburos en la asociación uno, dos y tres aún cuando la especie dominante sea de la familia de las ciperáceas y no formen asociación micorrícica.
12. La propuesta de restauración ecológica para el humedal contaminado por hidrocarburos se presenta en el capítulo 5.

7. RECOMENDACIONES

1. Para realizar estudios de restauración ecológica en humedales contaminados por hidrocarburos es necesaria la caracterización integral que involucre a los componentes del ecosistema: aire, agua, suelo, vegetación y fauna.
2. Se recomienda contrarrestar los efectos de reemplazamiento de la vegetación en humedales contaminados por hidrocarburos sin la utilización de especies exóticas, poniendo énfasis particular en los procesos ecológicos y las plantas nativas del sitio de estudio, lo cual permite revertir la degradación al incluir las condiciones requeridas del ecosistema.
3. Son herramientas básicas de la restauración ecológica de humedales contaminados por hidrocarburos la sucesión ecológica, los procesos naturales de redundancia, resiliencia y resistencia; así como las tecnologías ambientales principalmente las obras de ingeniería, biorremediación y fitorremediación como una herramienta.
4. Caracterizar y abundar en los usos de plantas nativas para la restauración ecológica de ecosistemas contaminados por hidrocarburos, con la finalidad de crear un listado de vegetación nativa de los humedales mexicanos contaminados por hidrocarburos de los tres estratos vegetales: hierbas, arbustos y árboles para la rehabilitación.
5. Generar alternativas de manejo de los residuos como se indica en el artículo 134, 136 y 140 de la LEGEPPA.
6. Definir el nivel de contaminación por residuos tóxico para contaminantes de hidrocarburos y se legisle, actualmente el contenido de hidrocarburos totales del petróleo es de 40 a 200 mgkg⁻¹.
7. Se han enfatizado en México estudios que hasta ahora se ubican en la etapa concepto, es necesario realizar pruebas a escala reducida con el fin de probar un manejo integral y sustentable de los desechos de hidrocarburos.

8. LITERATURA CITADA

- ABURTO, A., ROJAS A., QUINTERO R. 2000. Biotecnología perspectiva de la Investigación y el Desarrollo Tecnológico del Sector Petrolero al año 2025. Méx. D.F. Cap 6:136-152.
- ABDELOUS, 1999. Uranium contamination in the subsurface: characterization and remediation, pp. 433-473. In: uranium: mineralogy. Geochemistry and the environment. Ed. by burns p.c & finch r, 679 p.
- ABBOTT, L. K. y ROBSON A. D. 1982. Infectivity of vesicular arbuscular mycorrhizal fungi in agricultural soils. Aust. J. Agric. Res. 33: 1049-1059.
- ALBERT, L. A. LÓPEZ-MORENO, S. FLORES J. 1994. Diccionario de la contaminación. Centro de Ecología y desarrollo. México. D.F, 164 p.
- ALEXANDER, M. 1980. Introducción a la microbiología del suelo. Traducción al español por J. J. Peña C., AGT Editor, México, 491 p.
- ALARCÓN, A., M. C. GONZALEZ-CHAVEZ, R. FERRERA- CERRATO y A. VILLEGAS-MONTER. 2001. Efecto de *Glomus fasciculatum* y *Glomus etunicatum* en el incremento de plantas de *Vitis viníferas* L. obtenidos por micropropagación. Terra 19:29-35.
- ALARCÓN, A., R. FERRERA- CERRATO y A. VILLEGAS-MONTER y J. J. ALMAZÁS S. 1998. Efecto de la simbiosis micorrícica en la fotosíntesis de *Citrus volkameriana* Tanq. Anda Pasq., p. 119-125. In: Zulueta R. R., Escalona M. A., Trejo A. D (eds) Avances de la investigación micorrícica en México. Universidad Veracruzana. Xalapa, Ver.
- ALONSO, 1975. Diccionario del Español Moderno, México modernísimo para el despacho del Profesional, La oficina, la Universidad y el hogar. Ed. Aguilar, 880 p.
- ALVAREZ, J., S., I. SANCHEZ-GALLEN y P. GUADARRAMA C. 2004. Micorriza arbuscular y bases ecológicas para la restauración. Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias, UNAM. In: IV Symposium Nacional y II Symposium Iberoamericano de la Simbiosis Micorrícica, p 90.
- ALLEN, E. B. y M. ALLEN. 1986. Water relations of xeric grasses in the field: interactions of Micorrizas and competition. New Phytol. 104, 559 – 571.
- ANDERSON, T.A., E.A. GUTHRIE y B. T. Walton. 1993. Bioremediation the rizosphere. Environ. Sci. Technol. 27:2630-2636.
- ANDERSON, T. A; E. A. Gutrhrie; B. T. Walton. 1994. Bioremediation in the rizosphere (plant roots and associated microbes clean contaminated soil). Environ.Sci.Technology. 27(13):2630-2636.
- APRIL, M. T., J. M. FOGHT AND R. S. CURRAH. 2000. Hydrocarbon- degrading filamentous fungi isolated from flare pit soils in northern and western Canada. Can. Microbiol. 46:38-49.
- AUSTIN, M. P. L. BELBIN. 1981. An analysis of succession along an environmental gradient using data from a lawn. Division of Land Use Research, Intitute of Earth Resources, CSIRO, CAMBERRA, Australia. P. 19-30.
- AYLLON, T. T. y J. F. CHAVEZ. 1994. México: sus recursos naturales y su población. Segunda Edición. Limusa. México 320 p.
- AZCON, R. y A. OCAMPO J. 1984. Effect of root exudation on vesicular-arbuscular mycorrhizal infection at early stages of plant growth. Plant and soil 82(1):133-138.
- BABER, S. A., 1995. Soil nutrient bioavailability. John Wiley y Sons. EUA. 414 p.
- BAGO, B. C., AZCON-AGUILAR y SCHAR –HILL Y PTEFFER. 2000. El micelio externo de la micorriza arbuscular como puente simbiótico entre la raíz y su entorno, p. 78-92. In: Alarcón A. Ferrera –Cerrato R. (eds). Ecología, fisiología y biotecnología de la Micorriza arbuscular. Mundi- Prensa. México.
- BANKS, M.K.GOVINDARAJU R.S. SCHWAB A.P., KULAKOW P. FINN J. 2000. Phytoremediation of Hydrocarbon contaminated soil. Edited by Fiorenza Oubre, C.L. Woard, C.H. Lewis Publishers. Boca Raton, London, New York Washington, D.C. 163 p.
- BARROW, J. 1975. The response to phosphate of two annual pasture species. I. Effect of the soil's ability to adsorb phosphate on comparative phosphate requirement Aust. J. Agric. Res. 26, 137-143.
- BLACKBURN, J. W., E. J. HARNER, W. K. ROBBINS, R. C.PRICE, J. R.CLARK, R. M. ATLAS and J. B. WILKINSON. 1993. Experimental linkage of petroleum site biorremediation. Biodegradation 4:207-230.
- BAZZAZ, B.A. 1998. Plants in changing environments. Linking physiological, population and community ecology. University Press Cambridge, United Kingdom. 317 p.
- BRAUN-BLANQUET, J .1979. Fitosociología. Base para el estudio de las comunidades vegetales. H. Blume. Ediciones Madrid España.820 p.
- BRINSON, M. M., A. E. LUGO Y S. BROWN. 1981. Primary productivity, descomposition and consumer activity in freshwater wetlands. Ann. Rev. Ecol. Syst. 12: 123-161
- BOGDAN, A. V. 2000. Pastos tropicales y plantas de forraje, AGT Editor.
- BOLAN, N., S. 1991. A critical review on the role of mycorrhizal fungi in the uptake of phosphorus by plants. Plant soil 134: 189-207.

- BOLLAG, J-M., T. MERTZ AND L. OTJEN. 1994.** Role of microorganisms in soil bioremediation.: Bioremediation through rhizosphere technology. American Chemical Society, Chicago Illinois, August 23-27 of 1993. Washington DC, USA. In: T. A. Anderson and J.R. Coats (Eds.). ACS Symposium series 563. p.2-10.
- BONILLA-BARBOSA, J.R. A. NOVELO, R. 1995.** Manual de identificación de plantas acuáticas del parque nacional lagunas de Zempoala, México. Instituto de Biología. Universidad Autónoma de México. Cuadernos 26. 168 p.
- BORSDORF, A., DÁVILA, C., HOFFERT, H., TINOCO, C. I, 2004.** Espacios naturales de Latinoamerica. Laterinamerika-Studien Online. Fecha de consulta: noviembre 2004
<http://www.lateinamerika-studien.at/content/natur/naturesp/natur-1324.html>
- BOTELLO, V. A. y F. PAEZ. 1987.** El problema crucial: la contaminación. Serie medio ambiente en Coatzacoalcos Vol. I. Centro de Ecodesarrollo México. D. F. 181 p.
- BOTELLO, V. A. 1996.** Características, composición y propiedades fisicoquímicas del petróleo. In: Botello V.A., J. L. Rojas G., J. A. Benitez, D. Zárate L. (eds). Golfo de México, contaminación e impacto ambiental: diagnóstico y tendencias. Universidad Autónoma de Campeche. EPOMEX. Serie Científica. Campeche, México, p.203-210.
- BOTELLO, A. V. y G. PONCE. 1998.** Por el rescate ambiental del Golfo de México. La Jornada Ecológica. México, D. F. Año 6, No.65, p 6.
- BLOOM, C. W. P. M. y L. A. C. J. VOESENEK. 1996.** Flooding: the survival strategies of plants. TREE 11 (7): 290-295.
- BROOKS, R. R. (Editor). 1998.** Plants that hyperaccumulate heavy metals, CAB International, Cambridge, USA.
- BROWN, S. Y LUGO, A. 1994.** Rehabilitation of tropical lands: a key to sustaining development. Restoration Ecology 2(2).97-111.
- BRUNDETT, M., C. 2003.** Diversity and classification of mycorrhizal associations. Cambridge Philosophical Society. University of Western Australia. Pp.473-495
- BRUNDETT, M., C., B. KENDRICK W. y A. PETERSON C. 1991.** Efficient lipid staining in plant material with Sudan red 7B or fluorol yellow 088 in polyethylene glycol-glycerol. Biotechnic and Histochemistry 66:111-116.
- BRUNDETT, M., C, BOUGHER N., DELL B., GROVE T. and MALAJCZUK N. 1996.** Working with Mycorrhiza in forestry and agricultura. Australian Centre for International Agricultural Research (ACIAR) Monograph series. Cambera, Australia. 374 p.
- BURTON, T. 1997.** ¿Se podrá salvar el mayor lago de México? Un esfuerzo internacional de rehabilitación viene en camino. Revista Ambiental y Política Ecodecisión. Vol.23, invierno 1997. 28-30 p.
- CABEZÓN, G. I. Y. N. CÁMARA. CANEDO C. 2000.** Degradación microbiana de agentes xenobióticos y contaminación inorgánica. Fecha de consulta: febrero 2002.
<http://webcd.usal.es/web/trangen00/otrdoc/degramicragxen/biotecnología.htm>
- CÁMARA, C., R. 2000.** Dpto. Química Analítica, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Complutense de Madrid. Expohannover. Dirección electrónica:
<http://www.hannover.2000net/expo2000hannover/tecnología/proyectos/Fitorremediación/corto.htm>. Fecha de consulta: agosto 2002.
- CASADO, S., y C. MONTES. 1995.** Guía de los lagos y humedales de España. J. M. Reyero Editor. España. 255 p.
- CARPENTER, S. R., S.G. FISHER, N. B. GRIMM Y J. F. KITCHELL. 1992.** Global change and freshwater ecosystems. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 23:119-39.
- CLARK, F. E. 1965a.** Agar plate method for total microbial count. P 1460 – 1466. In: C.A. Black (Ed). Methods of soil analysis. Agronomy number 9. part 2. American Soc. Of Agr. Madison. Wisconsin. U.S.A.
- CRAWLEY, M. 1997.** Plant ecology. Blackwell Science. Oxford: 73-131.
- CROWLEY, D. E. y RENGEL Z. 1999.** Biology and chemistry of nutrient availability in the rhizosphere, pp. 1-40. In: Renden (ed.). Mineral nutrition of crops: Fundamental mechanisms and implications. Food products. New York.
- CUNNINGHAM, S. D., W. R. Berti and J. W. Huang. 1995.** Phytoremediation of contaminated soils. Elsevier Science 13:393-397.
- CUNNINGHAM, S. D., and D. OW, W. 1996.** Promises and Prospects of Phytoremediation. Plant Physiology 110:715-719.
[Http://www.conabio.gob.mx](http://www.conabio.gob.mx).
- CHANG, M. AND TSAO G.T. 1984.** Petroleum Formation: A Spontaneous Chemical Reaction from Carbohydrate to Hydrocarbon. Biotechnology and Bioengineering Symposium. p. 440-445.
- CHOW, P. S. 1998.** Petroquímica y sociedad. Primera reimpresión 1998, segunda impresión 1997. La Ciencia desde México es un proyecto y propiedad del Fondo de Cultura Económica, al que pertenecen también sus

- derechos. Subsecretaría de Educación Superior e Investigación Científica de la SEP y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Fondo de Cultura Económica.
- COOPER, K. M. 1984.** Physiology of VA mycorrhizal association, pp. 155-186 In: L. Powel C. y J. Bagyaraj D. (eds.) VA Mycorrhiza. CRC Press, Boca Ratón, USA. p. 155-186.
- CONNEL, JOSEPH H., R. O. SLATYER. 1977.** Mechanisms of succession in natural communities and their role in community stability and organization. *The American Naturalist*. Vol 111, No. 982. p. 1111-1143.9
- CHICHARRO, C. M., C. GUERRERO C., L. LÓPEZ, R. V. SÁNCHEZ, BENEDICTO. 2004.** Metales pesados y Medio Ambiente. Seminario 26. <http://usach.cl/ima/fitorrem.htm>
- DANIEL, P. W, HELMS U. E., BAKER F.S. 1982.** Principios de Silvicultura. Mc Graw Hill. Segunda edición. Traducido de la segunda edición en inglés Principles of silvicultura 1979. U.S.A.
- DIEGO, P. N. 1995.** Familia Cyperaceae: Taxonomía Florística y Etnobotánica, Etnoflora Yucatanense. 11:1995. Etnobotánica- Yucatán- Colecciones 2. Cyperaceae- Clasificación 3. Taxonomía vegetal. Serie II. Universidad Autónoma de Yucatán, México, p.123-172.
- DIEGO- PEREZ, N., R. M. FONSECA, L. LOZADA- PEREZ, y F. LOREA-HERNANDEZ. 1993.** Vegetación de las lagunas costeras y zonas inundables del Estado de Guerrero, México. *Brenesia* 39-40:7-28.
- DÍAZ, D. M. 1995.** El Régimen Jurídico Ambiental del Subsuelo en México. PEMEX: Ambiente y Energía Los retos del futuro Instituto de Investigaciones Jurídicas UNAM-PEMEX. México. p 35-55.
- DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN. 1986.** Norma Mexicana NMX-AA-23 Terminología. Los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de compuestos orgánicos volátiles provenientes del proceso de los separadores agua-aceite de las refinerías de petróleo. 15 de junio.
- DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN. 1995.** Norma Oficial mexicana NOM-075-1995. 1995. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. Norma Oficial Mexicana. Que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de compuestos orgánicos volátiles provenientes del proceso de los separadores agua-aceite de las refinerías de petróleo. 26 de octubre de 1995.
- DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN. 1996.** Decreto que reforma, adiciona y deroga diversas disposiciones de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente. Viernes 13 de Diciembre: 5-36.
- DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN 1999.** Norma Oficial Mexicana NOM-041- Semarnat-1999. Respecto a límites permisibles de hidrocarburos.
- DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN. 2002.** Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis, 52 p.
- DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN 2003.** . Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-042-SEMARNAT. Que establece los límites máximos permisibles de emisión de hidrocarburos no metano, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y partículas provenientes de emisión vehicular.4-44
- DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN 2005.** Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT-2003. Que establece los límites máximos permisibles de hidrocarburo en suelos y especificaciones para su caracterización y remediación.
- DIGGLE, A. J. y BELL L.C. 1984.** Movement of applied phosphorus following the mining and revegetation of mineral sands on Australia's east coast. *Aust. J. >Soil Res.* 22, 135-148.
- DIAZ, R. A. C., S. L. CAMARGO, R. 1995.** Restauración ecológica: ¿Herramienta o teoría ecológica? Tópicos de Investigación y Postgrado IV (4):230-234. Universidad Autónoma Metropolitana- Iztapalapa. P. 230-237
- DOBSON, A. P.,A.D. BRADSHAW Y A. J. M. BAXER. 1997.** Hopes for de future: restoration ecology and conservation biology. *Science.* 277:115-522
- ECOLOGÍA DE COMUNIDADES. 2004.** Fecha de consulta: noviembre 2004.
http://www.uprh.edu/~odum/eco_comunidades.3
- EMGRISA. 2002.** Sistemas de Tratamiento. Centro de Estudios Generales e Ingeniería.
<http://www.emgrisa.es/Temáticos/SuelosC/SisTratamiento>
- EPA, 2000.** A citize'n guide the phytoremediation: concisa y clara guía de la Agencia americana para la protección del medio ambiente para entender fácilmente los conceptos principales en la fitorremediación.
Dirección electrónica: <http://clu-in.org/products/citguide/phyto2.htm>. Fecha de consulta: marzo 2002.
- EPA. 2000a.** Introducción to Phytoremediation. EPA/6001/r-99/107. Cincinnati, Ohio,
- FAZ, C. A. 2001.** Contaminación, depuración de suelos y aspectos ambientales. Curso taller, Universidad Autónoma Chapingo. 55 p.
- FERNÁNDEZ- LINARES, L. T. 2002.** Tecnologías de Biorremediación de suelos. La Edafología y sus perspectivas al siglo XXI. "Investigación y educación hacia la sostenibilidad edáfica para el tercer milenio". Tomo I. Colegio de Posgraduados. Universidad Nacional Autónoma de México. Universidad Autónoma Chapingo. pp 230-238.
- FRANCO- RAMIREZ, A. L. VALERA-FREGOSO y R. FERRERA-CERRATO. 2004.** Diversidad de Hongos micorrícicos arbusculares en suelos contaminados con hidrocarburos en Tabasco. Colegio de Posgraduados

- en Ciencias Agrícolas, IRENAT. Área de Microbiología. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del IPN. In: IV Symposium Nacional y II Symposium Iberoamericano de la simbiosis micorrízica, p. 79.
- FRANCIS R., READ D. J. 1994.** The contributions of mycorrhizal fungi to the determination of plant community structure. Department of Animal and Plant Sciences, University of Sheffield. Netherlands. p 11-25
- FERNÁNDEZ, L. 2002.** Tecnologías de Biorremediación de suelos. La Edafología y sus perspectivas al siglo XXI. "Investigación y educación hacia la sostenibilidad edáfica para el tercer milenio". Tomo I. Colegio de Posgraduados. Universidad Nacional Autónoma de México. Universidad Autónoma Chapingo. p230-238.
- FERNANDEZ L., L. 2000.** Tecnologías de biorremediación en suelos. In: Quintero- Lizaola R. Reyna – Trujillo T, Corlay – Chee L, Ibáñez – Huerta A. y García – Calderón N.E. La edafología y sus perspectivas al siglo XXI. Tomo II. Colegio de Posgraduados. Universidad Autónoma de México, Universidad Autónoma Chapingo. México. p 700-705.
- FERNANDEZ L., L., L. I. MOLINA, A. E. QUIÑONES, A. E. HERNÁNDEZ y R. FERRERA- CERRATO, 2001.** Potential of Phytoremediation in Mexican Oil Contaminated Soil. A6 Phytoremediation of Petroleum Hydrocarbons (poster). Abstracts. In: *In situ* and *On site* Bioremediation the sixth International Symposium. Jun 4-7 2001. Battelle Putting Technology. San Diego California. USA, p. 76.
- FERRERA – CERRATO R. 1995.** Efecto de rizosfera In: R. Ferrera-Cerrato y J. Pérez Moreno (Eds). Agromicrobiología: elemento útil en la agricultura sustentable. Colegio de Posgraduados. Montecillos, México. Pp 36-55.
- FERRERA C., R., M. N RODRIGUEZ M., M. C GONZÁLEZ C. 1993.** Manual de Agromicrobiología. Editorial Trillas. p- 56- 70
- FLORES, M. J. A. 1989.** Bromatología animal. Ed. Limusa. Tercera edición-p.183
- FLORES, M., JIMENEZ L., MADRIGAL S., X. MONCAYO R. y F TAKAKI T. 1971.** Mapa y descripción de los tipos de vegetación de la República Mexicana. Secretaria de Recursos Hidráulicos. Dirección de Agrología. 59 p. 1 mapa.
- FRICK, C. M., R. FARELL E. and J. GERMIDA J. 1999.** Assessment of Phytoremediation as an *in situ* Technique for cleaning oil-contaminated sites. Report prepared by petroleum technology Alliance of Canada (PTAC). Calgary, Canada. p.82.
- FITTER, A. H. 1985.** Functioning of vesicular – arbuscular Micorrizas under field conditions. New Phytol. 99, 257- 265.
- FUENTES, Y., J. L. 1999.** El suelo y los fertilizantes. 5ª edición, Ediciones Mundi- Prensa. Madrid, España. 552 p.
- GANGE, A. C., V. BROWN y FARMER L. 1990.** A test of mycorrhizal benefit in an early successional plant community. New Phytol. 115, 85-91.
- GARCÍA, C. L. 1989.** Restauración de zonas y ecosistemas en degradación. Departamento de Ecología del I. V. I. A. Universidad de Valencia, España, 24 p.
- GARCÍA, G. E, R. FERRERA- CERRATO, J. J. ALMARÁZ S. R. RODRÍGUEZ V. 2000.** Colonización micorrízica arbuscular en gramíneas creciendo en un suelo contaminado con hidrocarburos. pp. 221-227. In: Ecología, Fisiología y Biotecnología de la Micorriza- Arbuscular. Alarcón A. R. Ferrera-Cerrato (eds). IRENAT-Colegio de Posgraduados, Montecillo. Mundi- Prensa. México. P.251.
- GERDEMANN, J. W. and TRAPE, J. M., 1974.** The Endogonaceae in the Pacific, Northwest, Mycología Memoria, núm. 5.
- GERDEMANN, J. W. 1968.** Vesicular-arbuscular mycorrhiza and plant growth. Annual review of phytopathology 6:397-402.
- GRANADOS, S. D., G. F. LÓPEZ R. y J. L. GAMA F. 2001.** Interacciones ecológicas de las plantas. Universidad Autónoma Chapingo, México. P. 187-216.
- GRANADOS, S. D., G. F., LOPEZ, R. 2000.** Sucesión ecológica. Dinámica sucesional. Universidad Autónoma Chapingo. 197 p.
- GLEBA, D., N. V. BORISJUK, L. G. BORISJUK, R. KNEER, A. POULEV, M. SHARZHINSKAYA, S. DUSHENKOV, S. LOGENDRA, Y., Y. GLEBA and I. RASKIN. 1999.** Use of plant roots for phytoremediation and molecular farming. Proceedings. National. Academic Science USA 96:5973-5977.
- GRAHAM, J. H. 1985.** Membrana regulation of mycorrhizal symbiosis, pp 155-156. In: Molina R. (Ed.). Proceedings of the 6º North American Conference on Mycorrhizae. Oregon State University, Corvallis
- GRIME, J. P., M. L. MACKEY, S. MILLER y READ D.J. 1987.** Floristic diversity in a model system using experimental microcosms. Nature. 328, 420-422
- GRIME, P. J. 1982.** Estrategias de adaptación de las plantas y procesos que controlan la vegetación. Ed. Limusa. 291p.
- GRIME, P. J. 1979.** Vegetation classification by referent to strategies. London, Inglaterra, 250: 26-31.
- GRIFFIN, D. H. 1994.** Fungal physiology. Second Edition, Wiley- Liss. New York, EUA. p. 176-184.

- GÓMEZ, S.A. 2000. Feasibility studies and toxicity test for phytoremediation of soils contaminated with hydrocarbons p. 235-239. In: Le B.G., Rojas N. and State of the art and perspectives. Proceedings. Instituto Mexicano del Petróleo. Petroleum Biotechnology. Program Mexico City.
- GIRARD, R. H. R. 1988. Biodegradación microbiana del petróleo en ecosistemas acuáticos. Subdirección Técnica Administrativa. Coordinación Ejecutiva para el Desarrollo de las Zonas Petroleras. Gerencia de Coordinación y Control de Protección Ambiental, PEMEX. México. 70 p.
- GOMEZ, L. D. 1984. Las plantas acuáticas y anfibios de Costa Rica y Centroamérica. 1. Liliopsida. Museo Nacional de Costa Rica Missouri Botanical Garden y Mesoamerican. Ecology Institute, Tulane University. Ed. Universidad Estatal a Distancia. San José, Costa Rica.
- GONZALES, R. G. A. 1995. Impacto ambiental de la industria petrolera en el estado de Tabasco. Memoria de Practica Profesional. Universidad Autónoma de Chiapas. Villaflores, Chis., México. 96 p.
- GONZALES, A. R. L. y R. R. QUINTERO. 1995. La Biotecnología ambiental en México. Segundo Minisimposio Internacional sobre contaminantes en agua y suelo. Instituto de Ingeniería de la UNAM.
- HACSKAYLO, J. 1972. Mycorrhiza: The ultimate in reciprocal parasitism? BioScience, 22(10):577-583.
- HERNÁNDEZ, A. E. 2002. La Rizosfera de las plantas gramíneas y leguminosas en la fitorremediación de suelos contaminados por petróleo. Tesis de Doctorado. Colegio de Posgraduados, p. 61.
- HERNÁNDEZ, D., A. 1991. Las micorrizas. Fecha de consulta abril 2003. <http://www.cdeea.com/micorrizas.htm>.
- HOBBS, R. S and D.A. Re-integrating fragmented landscapes. A preliminary fram western Australian landscape. A preliminary fram western australian wheatbelt. Journal of environmental management. 33:161-167.
- HUSTON, M.A., 1994. Biological diversity. Cambridge University Press. Cambridge. 681 p.
- HULST, V. R. 1979. On the dynamics vegetation: succession in model communities. Department of Plant Sciences, University of Western Ontario, London, Ontario, Canadá. P. 85-96.
- ITURBIDE, R y I. NAVARRO. 1997. Lineamientos para la evaluación y saneamiento de sitios contaminados por hidrocarburos en México. Resumen del seminario internacional sobre restauración de sitios contaminados, 26 al 29 de mayo de 1997. Instituto Nacional de Ecología- SEMARNAP. Agencia de Cooperación Internacional del Japón y Centro Nacional de investigación y capacitación ambiental. México, D.F. pp9.
- INEGI. 2004. Sistemas Nacionales estadísticos y de información geográfica. Cobertura temática. Fecha de consulta: octubre 2004. <http://dgcnesyp.inegi.gob.mx/BDINE/D10/D1000172.HTM>
- INEGI. 1999. Anuario Estadístico del Estado de Veracruz. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, Ags.
- INEGI. 1996. Fotografías aéreas. Zona E-14-7, línea 206, Pos:17N56.28,O94W29.99,Alt:39200ft. Esc. 1:75,000.Área de Minatitlán, Ver. Río Coatzacoalcos. Pantano de Sta. Alejandrina y Refinería Lázaro Cárdenas.
- ILCE-ONLINE COMMUNICATIONS, 2000 .Texto basado en el video: *Río Coatzacoalcos*, México, (serie *Ríos de México*).Instituto Latinoamericano de Comunicación Educativa (ILSE). Fecha de consulta: octubre 2004. <http://www.elbalero.gob.mx/historia/html/contempo/nacipet.html>
- IMP. 1999a. Estudio de distribución de la contaminación por hidrocarburos presentes en subsuelo y manto freático acuifero de la superintendencia de ventas de Hermosillo, Sonora. p56.
- IMP. 1999b. Determinación del grado de contaminación por hidrocarburos en el subsuelo y efecto del potencial de migración así como la valoración de riesgo a la salud en la Terminal de almacenamiento y Distribución de Salina Cruz, Oaxaca. p 67.
- INGENIERIA CIVIL Y MEDIO AMBIENTE. 2001. Biorremediación. Otros métodos. Fecha de consulta: Agosto 2005. [http://www.miliarium.com/Proyecto/Suelos Contaminados/Descontaminación de Suelos/ Otras técnicas.asp](http://www.miliarium.com/Proyecto/Suelos%20Contaminados/Descontaminación%20de%20Suelos/Otras%20técnicas.asp).
- ISLAS, L. A. 2001. Cinética microbiana en la biorremediación de suelo contaminado con gasolina. Tesis de licenciatura. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. p. 81.
- ITURBIDE, R Y I. NAVARRO. 1997. Lineamientos para la evaluación y saneamiento de sitios contaminados por hidrocarburos en México. Resumen del Seminario Internacional sobre restauración de sitios contaminados, 26 al 29 de mayo de 1997. Instituto Nacional de Ecología- SEMARNAP. Agencia de cooperación internacional del Japón y Centro Nacional de investigación y capacitación ambiental. México, D.F. pp.9.
- JASPER, D. A., ROBSON A. D. y ABBOTT L. K. 1987. The effect of surface mining on the infectivity of vesicular – arbuscular mycorrhizal fungi. Aust. J. Bot. 35, 641 – 652.
- JASPER, D. A. 1994. Management of mycorrhizas in revegetation. Soil Science and Plant Nutrition, School of Agriculture, The University of Western Australia, Nedlands WA 6009, Australia. P.211-219
- JASPER, D. A. 1994 a. Bioremediation of agricultural and forestry soils with symbiotic microorganisms. Soil Citol. And Biochem. 32:1301-1319.
- JORDAN, W., GILPIN M. A. J. 1990. Restoration ecology: a synthetic approach to ecological research. Cambridge University Press. Great Britain.342p.

- JOSEPH, I. N., M. FUENTES., A. NAVARRO Y M. BELLOTA. 1995. Degradación de petróleo por una población bacteriana marina mixta. I Reunión Internacional de Ecología Microbiana. México, D. F. Centro de Investigaciones de estudios avanzados (CINVESTAV – IPN) p.87
- KRAMER, P. J. 1983. Water relations of plants. Academic Press, Inc. New York. P 25-56.
- KENTULA, M.E. 1996. Wetland restoration and creation. In: National water summary on wetland resources. Compiled por: J.D. Fretwell, J.S. Williams, y P.J. Redman. U.S. Geological Survey, Water Supply Paper 2425. Washington D.C. 87-92.
- KETCHUM, A. 2003. Biorremediación. Página electrónica: Porqué biotecnología. Fecha de consulta diciembre 2004.
www.porquebiotecnologia.ar, <http://images.google.com.mx/imgres>
- KRISHNAMURTHY, L. M. ÁVILA. 1999. Agroforestería Básica. Programa de las naciones Unidas para el Medio Ambiente. Oficina Regional para América Latina y el caribe. Serie textos básicos para la formulación ambiental. 3:184-188.
- KOBAYASHI, S. TURNBULL J.W., TOMA T., MORI T., N MAJID.M., 1999. Rehabilitation of degraded tropical forest ecosystems. Center for international forestry research. Bogor, Indonesia, 226 p.
- KORDA, A., P. SANTAS, A. TENENTE and R. SANTAS. 1997. Petroleum hydrocarbon biorremediation: sampling and analytical Techniques *in situ* treatments and commercial microorganisms currently used. Applied Microbiology Biotechnology. 48: 677–686.
- KORMANIK, P. P., C. BRYAN W. and C. SCHULTZ R. 1989. Procedures and equipment for staining large numbers of plant roots simples for endomycorrhizal assay. Can. J. Microbial.26:536-538.
- KUMAR, P. B., A. N. DUSHENKOV, H. MOTTO, and I. RASKIN. 1995. Phytoextraction: Use of plants to remove Heavy Metals from soils: Environmental Science Technology. 29: 1232-1238.
- KNIGHT, W, G.F. ALLEN M., JJURINAK J. y M. DUDLEY L.1989. Elevated carbon dioxide and solution phosphorus in soil with vesicular- arbuscular mycorrhizal western wheatgrass. Soil Science society of America Journal. 53(4):1075-1082.
- KOTHARI, S. K. MARSCHNER H. y ROMHELD V. 1991. Effect of a vesicular- arbuscular mycorrhizal fungus and rhizosphere micro- organism on manganese reduction in the rhizosphere and manganese concentration in maize (*Zea mays* L) New Phytologist. 117 (4):649-655.
- LAMB, P. 1994. Reforestation of degraded tropical lands in the Asia- Pacific region. Journal of Tropical Forest Science 7(1):1-7.
- LA GRAGA, D., MICHEL, BUCKINGHAM L. PHILLIP., EVANS, C.JEFFREY. 1999. Gestión de residuos tóxicos. Tratamiento, eliminación y recuperación de suelos Vol. 1 y 2. Ed. Mc Graw Hill. 625 p.
- LEE, E. y M. K. BANKS. 1993. Bioremediation of petroleum contaminated soil using vegetation: a microbial study. J. Environ. Sci. Health A 28:2187-2198.
- LEDESMA, J. L., L. ARROYO Y J. L. HERNÁNDEZ. 1994. Toxicología ambiental, análisis de la contaminación ambiental por derrames de hidrocarburos en el Estado de Tabasco y su biorremediación por medio de tecnología de punta. Reporte no publicado. Instituto Tecnológico de Minatitlán, Veracruz. 186 p.
- LOPEZ, M., A. 1991. Causas, Procesos y Consecuencias de la contaminación de suelos. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Departamentos de Suelos, Méx. p. 89.
- LOT, A., 1991. Flora y vegetación de las zonas acuáticas de Veracruz. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Biológicas, UNAM, México, D. F. 226 p.
- LÓPEZ, E. C. 2002. Vitricación de las plantas cultivadas *in vitro*. E. E. La Mayora (CSIC). España. P.1-2.
- LUGO, A. 1998. The future of the forest: ecosystem rehabilitation in the tropics. Environment. 30(7):17-20, 41-45.
- LUNA, G. M. L., C. VEGA J., M. O, FRANCO, H, S. VASQUEZ M, N. TRUJILLO T., E. RAMÍREZ FY L. DENDOoven. Actividad microbiana de suelos. Avance y Perspectiva Vol. 21. XXX Aniversario de Biotecnología y Bioingeniería. P.328-333
- MACHADO. C. A. 2001. Restauración ecológica: una introducción al concepto. European Centre of Nature Conservaron (ECNC).
<http://www.gobcan.es/medioambiente/revista/2001/22/278/index.html>
- MAGURRAN, E. A. 1989. Diversidad ecológica y su medición. University Collage of North Wales. Titulo original: Ecological Diversity and Inst. Measurement, traducción por Dra. Antonia M.Cirer. Ed. Vedral. Barcelona, España, 183 p.
- MAYORGA, R.A. y VAZQUEZ, N. J. L 2000. Impacto de tlacolilt sobre la diversidad florística en el sur del municipio de Zumpahuacan, estado de México. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. 117 p.
- MARQUEZ – ROCHA F., V. HERNÁNDEZ- RODRÍGUEZ and R. VÁZQUEZ-DUHALT.1999. Diesel renewal from a contaminated soil by natural hydrocarbon – degrading, microorganisms. In: B.C. Alleman and A. Leeson B. (Eds.). *In situ* bioremediation of petroleum hydrocarbon and other organic compounds. The fifth

- International In situ and On-site Bioremediation Symposium, San Diego California, April 19-22, 1999. Battelle Press, Columbus Ohio, USA, p. 409-414
- MALDONADO, J. J. 1997.** Alternativas en la alimentación del ganado Bovino en Minatitlán, Ver. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Zootecnia. p. 8-16
- MANAHAN, S. E. 1999.** Environmental Science Technology and Chemistry. In: Environmental Chemistry. Seventh de CRC Press LLC. Boca Raton, Florida, p.35-70
- MARTÍNEZ, R. E. 2002.** Restauración ecológica y biodiversidad, Conabio, p. 1-4.
- MARTÍNEZ M., L; MORENO- CASASOLA, P; y G. VÁZQUEZ. 1997.** Long term effect of sand movement and inundation by water on tropical coastal sand dune vegetation. *J. Canadian Bot.* 75: 2005-2014.
- MARTÍNEZ, E. y S. F. LÓPEZ. 2001.** Efecto de hidrocarburos en las propiedades físicas y químicas de suelo arcilloso. Instituto Mexicano del Petróleo. Gerencia de protección Ambiental. Laboratorio de Remediación de Suelos. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura. Unidad Zacatenco. Instituto Politécnico Nacional. In. Terra.19:1: 9-17
- MARGALEF, R. 1974.** Ecología. Omega. Barcelona, España. 951 p.
- MARSCHNER, H. 2002.** Mineral nutrition of higher plants. Second edition, Academic Press. London, Great Britain. 888 p.
- MARSCHNER, H. y DELL B. 1994.** Nutrient uptake in mycorrhizal symbiosis. In Robson A.D., Abbott L. K. Melajczuk N.(eds).Management of mycorrhizas in Agriculture, Horticulture and Forestry. Kedwer Academic Publishers.Pert, Australia. Pp 89-102.
- MERHA, O. P. and M. L. Jackson. 1960.** Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite – citrate system buffered with sodium bicarbonate. Clays and Clay Min 7th Conf: 317-327.
- MCGILL, W. B., M.J.ROWELL and WESTLAKE, B.W.S. 1981.** Biochemistry Ecology and Microbiology of Petroleum Components Soil. In Paul, E. A. and Ladd, J. N. (eds.) Soil Biochemistry 5:229-296.
- MIDDLETON, B. 1999.** Wetland restoration, flood pulsing, and disturbance dynamics. J. Wiley and Sons, Inc. N. Y.
- MILIARIUM. 2004.** Fitorremediación. Ingeniería civil y medio ambiente. Fecha de consulta: diciembre 2004.
<http://www.miliarium.com/Proyectos/Suelos/DescontaminacionSuelos/TecnicasInSitu/TecnicasBiologicas/Fitorremediacion.asp>
- MILLER, R. M. y JASTROW J. D. 1991.** The application of VA mycorrhizae to ecosystem restoration and reclamation. In Mycorrhizae to ecosystem restoration and reclamation. In Mycorrhizal functioning: And Integrative Plant – Fungal Process. Ed. M.;F. Allen. Routledge. Chapman and Hall, New York.
- MINATITLÁN, OBRAS Y ACCIONES. 2004.** Fecha de consulta: agosto 2004.:
<http://www.minatitlan.gob.mx/hoy.php>. Fecha de consulta. Octubre 2004.
- MITSCH, W. J and J. G. GOSSELINK, 2000.** Wetlands. John Willey y Sons. N. York. 3ª edición, 920 p.
- MIRANDA, F., y E. HERNANDEZ, X., 1963.** Los tipos de vegetación de México y su Clasificación. *Biol. Soc. Bot. México.* p. 29-179.
- MOLINA, L. D. 1993.** Biorremediación de suelos. *Tecnología Ambiental. Petróleos Mexicanos. Vol. II, No. 1.* p. 5-11
- MORENO, C. P; LOPEZ H; GARZA S., ABARCA y HERZIG (eds) 2001.** La vegetación de los humedales mexicanos. Manual para el manejo y la conservación de los humedales de México. Segunda edición.113 p.
- MORENO, N., CORSEUIL, XAVIER H., 2002.** Fitorremediación de acuíferos contaminados por benceno y etanol utilizando Sauce Llorón (*Salix babylonica*). Ingeniería Sanitaria y Ambiental, no. 49:1-4.
<http://www.aidisar.org/isa43.html>.
- MONCAYO, R. I. 2002.** Micorrizas: Solución para la reforestación y recuperación de suelos contaminados. Biotriton S.A. Santiago de Chile. www.biotri.ton.cl.p1-3. Fecha de consulta: marzo 2002.
- MORALES, P. J. L. 1969.** Propagación de hongos filamentosos en fracciones del petróleo. Tesis Profesional. Instituto Politécnico Nacional. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas. México. D. F. pp 2-4.
- MÜLLER, D., D. y H. ELLENBERG. 1974.** Aims and methods of vegetation ecology. John Willey & Sons.U.S.A.547 p.
- MUKERJI, K.G.; R. JAGPAL; M. BALI Y REKHA RANI. 1991.** In: Plant roots and their environment. B.L. McMichael y H. Persson (Eds). Elsevier Science Publishers. Amsterdam. 290-308.
- NELSEN, C. E. 1987.** The water relations of vesicular – arbuscular mycorrhizal systems. In Ecophysiology of VA Mycorrhizal Plants. Ed. G.R. Safir. CRC. Press, Boca Raton. Florida
- NUÑEZ, L., R.A, MEAS, V.Y; ORTEGA, B.R, OLGUIN, J.E. 2004.** Fitorremediación, Fundamentos y Aplicaciones. Ciencia. Revista de la Academia Mexicana de Ciencias. 55(3):23-27 p.
- ODUM, P. E. 1972.** ECOLOGÍA. Ed. Interamericana. Traducido al español por Sr. Carlos Gerhard Ottenwaelder. 3ª Edición, México, p. 403-405.
- OLGUÍN, E. J., HERNÁNDEZ, E. y RAMOS, I. 2002.** The effect of both different light conditions and the pH value on the capacity of *Salvinia minima* baker for removing cadmium, lead and chromium, *Acta Biotechnol.* (22)1-2: 121-131

- OLAN, C. D. 2000.** Estimación de niveles permisibles de hidrocarburos totales de petróleo, poliaromáticos carcinogénicos y metales, en el Activo Cinco Presidentes, Tabasco. Tesis de Licenciatura. División Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma Tabasco. Villahermosa, Tabasco, 102 p.
- ORTÍZ, S. C. A Y Ma. Del C, GUTIERREZ-CASTORENA. 1999.** Evaluación taxonómica de sistemas locales de clasificación de tierras. *Terra* 17(4):277-286.
- ORTIZ, R., S. 2001.** Migración de hidrocarburos en suelos orgánicos cercanos a sitios de explotación petrolera en el Distrito de Agua Dulce, Tabasco. Tesis de licenciatura. UNAM, 20 p.
- OTRI. 2000.** Fitorremediación. Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación. Universidad Complutense. p1-2
http://www.ucm.es/info/otri/complutenco/fichas/tec_ccamara1.htm
- ORELLANA, R.A.A.L. 1990.** La sucesión secundaria del matorral mediterráneo tras su perturbación. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla.
- PAVIA, D.L., M.G. LAMPMAN, S.G. KRIZ and G.R. ENGEL. 1990.** Introduction to Organic Laboratory Techniques Saunders of America. First Edition. pag 155-166.
- PEMEX. 1988.** El petróleo. Anuario Estadístico de PEMEX. Gerencia de información y relaciones públicas México, D. F.
- PENNINGTON, T.D., SARUKHÁN. J. 1998.** Árboles tropicales de México, Manual para la identificación de las principales especies. Universidad Nacional Autónoma de México. Fondo de Cultura Económica. 521 p.
- PEÑA, E., CARTER D. AYALA-FIERRO. 2001.** Toxicología Ambiental. Evaluación de riesgos y restauración ambiental. Instituto Nacional de Ciencias de la Salud Ambiental del Gobierno de los Estados Unidos de América dentro del proyecto de investigación básica para el Superfund otorgado a la Universidad de Arizona. 225 p.
- PÉREZ, V. J., GARCÍA-ESQUIVEL G., GARCÍA-ESPARZA F. 2002.** Papel ecológico de la flora rizosférica en fitorremediación. *Avance y Perspectiva*, Vol. 21. XXX. Aniversario de Biotecnología y Bioingeniería, p. 297-300.
- PEREZ-VEGA, A. y M. A. ORTIZ-PEREZ. 1996.** Vulnerabilidad de una porción costera del estado de Veracruz, México, ante las variaciones del nivel del mar. *Jaina* 7 (3-4):3-5.
- PETERSON, L. R. P. BONFATE. 1994.** Comparative structure of vesicular-arbuscular mycorrhizas and ectomycorrhizas. Department of Botany, University of Guelph, Notario, Canada. 1p. 79-88.
- PHILLIPS, J. M. and HAYMAN D.S. 1970.** Improve procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular mycorrhizal fungi, for rapid assessment of infection. *Trans Br. Mycol. Soc.* 55:158-160.
- PODER EJECUTIVO FEDERAL. 1996.** programa Forestal y de Suelo 1995 - 2000. Dirección General de Comunicación Social de la Semarnap. México. D.F. 211 p.
- RASKIN, I., ENSLEY B.D. 2000.** Phytoremediation of Toxic Metals. Using plants to clean up the environment. A Wiley-Interscience publication Jhon Wiley & SONS, Inc. United States of America, 303 p.
- RADWAN, S; SORKHOH, N; and EL-NEMR-ISRAA. 1998.** Oil biodegradation around roots. *Nature* 376:302.
- REBOLLEDO, R. H. H. 1999.** SAS en microcomputadora. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México. 176 p.
- REDDY, K.R. and W.H. SMITH (Eds), 1987.** Aquatic plantas for water treatment and resource recovery. Orlando, Magnolia Publishing.
- READ, D. J., R. LEAKE J. y R. LANGDALE A. 1989.** The nitrogen nutrition of mycorrhizal fungi and their host plant. In: Boddy L., Marchant R. y J. Read D. (Eds.). Nitrogen, phosphorus and sulphur utilization by fungi. Symposium of the British Mycological Society held at the University of Birmingham. pp. 181-204.
- RIVERA, C., M, FERRERA- CERRATO, R. VOLKE-HALLER V, FERNÁNDEZ LINARES, L. RODRÍGUEZ-VAZQUEZ R. 2002.** Poblaciones microbianas en perfiles de suelos afectados por hidrocarburos del petróleo en el Estado de Tabasco. México. *Revista Agrociencia* 36:149-160
- RISER- ROBERTS, E. 1998.** Remediation of petroleum contaminated soils. Biological Physical and Chemical Processes. Lewis. Publishers. Boca Ratón, USA, 542 p.
- RZEDOWSKI, J. 1978.** Vegetación de México. Limusa, México. 432 p.
- RZEDOWSKI, J. and C. Rzedowski, G. 1990.** Flora Fanerogámica del Valle de México. Volumen III. Monocotiledónea. Instituto de Ecología.
- ROSENBERG, E. 1981.** The hidrocarbon-oxidizing bacteria. Pp 446-459. In: Truper, E.G., M.Dworking, W.Harbo, K.H. Schleifer (Eds.). *The Prokaryote*. 1a. Edition.
- RUBIO, S. 2002.** La Fitorremediación: una nueva herramienta contra la contaminación.
http://www.usc.es/bioprocess/articulos/nacho_02.html
Fecha de consulta: octubre 2002
- SALT, D. E., M. BLAYLOCK, N. P. B. A. KUMAR, V. DUSHENKOV, B. D. ENSLEY, LL. CHET Y LL. RASKIN. 1995.** Phytoremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants. *Biotecnology*, 13:364-468.

- SARRE, A. 1995. Tiempo de rehabilitar los bosques. Actualidad Forestal tropical. Boletín de la Organización y el desarrollo sostenible de los bosques tropicales. 3:1:1-5
- SANCHEZ, L. R. 1995. La aplicación de la ingeniería geológica en la prevención de riesgos naturales e inducidos en el control de las afectaciones ambientales del suelo y subsuelo. Geólogos de México. Revista del Colegio de Ingenieros. Órgano Oficial del Colegio de Ingenieros Geólogos de México. 2:27-31.
- SAVAL, B., S., 1995. Remediación y Restauración, en PEMEX Ambiente y energía. Los retos del futuro, México, UNAM-Petróleos Mexicanos.
- SAVAL, B. S. 1995b. Acciones para la remediación de suelos en México. Memorias del segundo simposium internacional sobre remoción de contaminantes de aguas y suelos. Noviembre 17. Instituto de Ingeniería, UNAM, México, p.168-173
- SAVAL, B. S. 1997. Biorremediación de un suelo contaminado por diesel. Ingeniería y Ciencias Ambientales.33:24-30
- SAVAL, B. S. 1998. La responsabilidad jurídica en el daño ambiental. UNAM-PEMEX. Instituto de Investigaciones Jurídicas. Serie: Varios Núm. 87:209-235.
- SAVAL, B., LESSER M., J. 2000. Caracterización y comportamiento de la contaminación con hidrocarburos en un suelo arcilloso. Ingeniería y Ciencias Ambientales. Núm. 51, Noviembre- Diciembre, p. 25-30.
- SAVAL - BOHÓRQUEZ, S., 2004. La Reparación del daño. Aspectos técnicos: Remediación y Restauración. Artículo en formato Acrobat Reader.
- SALT, D. E, M. BLAYLOCK., N.P.B.A. KUMAR., V. DUSHENKOV., B. D. ENSLEY., I. CHET AND I. RASKIN. 1995. Phytoremediation: A novel Strategy for the Renoval of Toxic Metals from the Environment Using Plants. Biotechnology 13: 468-474.
- SEMARNAT- Subsecretaría de gestión para la protección ambiental. 2002. Guía para la presentación de la manifestación de impacto ambiental, industria del petróleo. Modalidad particular. 155 p.
- SIEVERDING, E. 1991. Vesicular- arbuscular mycorrhizae management in tropical agrosystems. Technische Zusammenarbeit GMBH. Eschborn, Alemania. p. 165-279.
- SIEVERDING, E. and TORO T.S. 1998. Influence of soil water regimes on VA mycorrhiza. V. Performance of different VAM fungal species with cassava. Z. Acker. Pflanzenbau. 161(5):322-332.
- SCHENCK, N. C, y PÉREZ, I., 1990. Manual for the identification of VA Mycorrhizal fungi, 3ª. Edición. Gainesville, Florida.
- SEMARNAT-PROFEPA. 1999. Restauración de Suelos Contaminados. Grupo de Trabajo sobre Restauración de Suelos Contaminados. México. p. 1-7
- SEMARNAT-PROFEPA. 2002. Fuga de gasolina en la Refinería Gral. Lázaro Cárdenas en Minatitlán, Ver. Méx.
- SCHNOOR, J. L. 1998. Phytoremediation. GWRTAC Technology Evaluation Report TE-98-01.
- SALISBURY, E.J. 1942. The reproductive capacity of plants, Bell, Londres.
- SCHROEDER, R. H. A., DOMINGUEZ R. V., GARCÍA H. L. 1999. Potencial de la Biorremediación de suelo y agua impactados por petróleo en el trópico mexicano. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ciencias Biológicas, Villahermosa, Tabasco, Méx. p. 159-173.
- SARH.1991. Las Gramíneas de México. Subsecretaría de Ganadería. COTECOCA. p. 22-25.
- SCHNEIDER, R. D. and R.J. BILLINGSLEY. 1990. Biorremediation: A desk manual for the environmental professional. The magazine of environmental control: Pollution Engineering. Gulf Publishing Company, Houston, USA. 97 p.
- SOTO, A., G. J., A. GUGES F., C. CÁRDENAS, A. ARANJO Y S. DELGADO. 1997. Biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburo utilizando bacterias autóctonas. Maracaibo. IV. Congreso Interamericano sobre Medio Ambiente. RICA/ANIVO. Simón Bolívar, Caracas, Venezuela. P. 11-13.
- SUTHERSAN, S.S. 1997. Remediation engineering: design, concepts. CRC Press. Lewis Publishers, USA. 362 p.
- SMITH, S.E. y D.READ J. 1997. Mycorrhizal symbiosis. Academic Press. San Diego, California.
<http://metea.uniba.it/database/aplicazioni/phytoremediation.htm>
- TATE, L. R. 1944. Soil Microbiology. John Wiley and Sons. Canadá y Estados Unidos de América, p.494.
- THALASSO, F. R. PINEDA O. 2002. Biofiltración: tratamiento biológico de aire contaminado. Avance y Perspectiva 21. XXX Aniversario de Biotecnología y Bioingeniería. P.325-327
- TEJERO, D. D. J. 1980. Manual para la identificación de algunos rangos taxonómicos de las plantas vasculares mexicanas. Escuela nacional de estudios profesionales Iztacala. Universidad Nacional Autónoma de México, México D. F.
- TLATILPA, S., I. F, 2003. Endomicorrizas e hidrogel en la nutrición mineral de jitomate (*Lycopersicum sculentum*). Universidad Autónoma Chapingo. Tesis de Licenciatura. Departamento de Suelos.
- TISSOT, B. P and D. F. WELTE. 1982. El petróleo su formación y localización. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. México. 589 p.
- TISDALL, J. M. 1991. Fungal hyphae and structural stability of soil. Aust. J. Soil Res. 29, 729 – 743.

- TISDALL, J. M and M. OADES J. 1979.** Stabilization of soil aggregates by the root systems of ryegrass. *Australian Journal of Soil Research* 17:429-441
- TORRES, D.R. 2003.** Tipos de Biorremediación. *Ecosistema. Revista Científica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente.* Asociación Española de Ecología Terrestre. Mayo-Agosto. Núm.2:XII: 2-5
- TRUJILLO, N., A; C. J. ZAVALA y A. L. BUCIO. 1991.** Contaminación por hidrocarburos aromáticos y metales pesados en suelos inundables de Tabasco. In: Tovar S. J. L., y L. R. Quintero (Eds.) *La investigación edafológica de México. 1990-1991. Memorias XXIV. Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo.* Pachuca, Hidalgo, p. 74.
- TRUJILLO, N., A., J. ZAVALA, C. y L. LAGUNAS, E. DEL C. 1995 c.** Contaminación de suelos por metales pesados e hidrocarburos aromáticos en Tabasco. 45-52. In: VIII Reunión Científica- Tecnológica y Agropecuaria. INIFAP, Tabasco. p 67-72.
- TRUJILLO, N., A., E. L. C. LAGUNAS R. y G. A. GONZÁLEZ, 1995 b.** Metales pesados e hidrocarburos en suelos del estado de Tabasco. In: Tovar, S. J. L. V. Ordáz Ch. y R. Quintero L. (eds.) *La investigación Edafológica en México 1992-1995. Memorias XXVI Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo.* Cd. Victoria, Tamaulipas, México. p. 41.
- TISSOT, B. P. and WELTE D. F. 1982.** El petróleo, su formación y localización. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. México, D.F. 589 p.
- INEGI. 1997.** Minatitlán, Estado de Veracruz. Cuaderno Estadístico Municipal, INEGI Y H. Ayuntamiento Constitucional de Minatitlán, México.p. 1-11.
- USEPA, 1997.** Innovate Uses of Composting: Bioremediation an pollution prevention. Publ.EPA/530/F-97/042
- VAN DOBBEN, W.H, 1967.** Physiology of growth in two *Senecio* species in relation to their ecological position. *Jaarb. I. B. S.,* 75-83
- VEGA, C. J. 2000.** Fitorremediación, alternativa contra la contaminación. <http://www.cuautitlan2.unam.mx/comunidad/2001/num.2/uc1.2.htm>
Fecha de consulta: abril 2002
- VIEJO M, J. L. 2002.** Biodiversidad y Paisaje. Departamento de Biología, Universidad Autónoma de Madrid. Madrid, España.
- VIEJO M, J. L., DE SILVA, C., IBERO, C and, J. MARTÍN1991.** Selection of Lepidopterologically interesting areas in Central Spain using UTM. *Distribution Maps. J. Res. Lep.* 28 (4): 289-296.
- YAÑEZ, A. A., R. TWILLEY y A. L. LARA-DOMINGUEZ. 1998.** Los ecosistemas de manglar frente al cambio climático global. *Madera y Bosques* 4(2):3-19.
- WARCUP J. H. y Mcgee P. A. 1983.** The mycorrhizal associations of some Australian Asteraceae. *New Phytol.* 95, 667-672.
- WALTON, T. B., A.M. HOYLMAN, M. PEREZ, T.A. ANDERSON, T.R. JOHNSON, E.A. GUTHRIE and R. F. CHRISTMAN. 1994 b.** Rhizosphere microbial communities as a plant defense against toxic substances in soils. In: T.A. Anderson and J.R. Coats (Eds). *ACS Symposium series 563: Bioremediation through rhizosphere technology.* American Chemical Society. Chicago Illinois, August 23-27 of 1993. Washington DC, USA. p. 82-92
- WEBSTER, J. R. and E.F. BENFIELD. 1986.** Vascular plant breakdown in freshwater ecosystems. *Ann.Rev.Ecol.Syst.* 17:567-94.
- WESTEL, R. G. 1990.** Land- water interfaces: metabolic and limnological regulators. *Vehr. Int. Verein. Limnol.* 24:6-24.
- WILCOX, H. E. 1993.** Mycorrhizae. College of Environmental Science and Forestry, State University of New York at Syracuse, New York, EUA. P 689-721.
- WOODWARD, R. Y M.J.DAY. 1996.** Intrinsic bioremediation: preparation, planning, monitoring and control. In: PEMEX Seminary. Arco Chemical Co., Applied Hydrology Associates, Inc. Sierra Environmental Services, Memorias del Seminario: Las actividades petroleras en áreas bajas de importancia ecológica. PEMEX, Villahermosa, Tab. 182-194
- ZAVALA, C. J; G. S. SALGADO; E. L. C. LAGUNAS; N. L. A. ACEVES; Y B. A. RUÍZ. 1995.** Metales pesados e hidrocarburos en suelos del Plan Chontalpa, Tabasco. p.43. In: Tovar, D. J. L. V. Ordáz Ch. y R. Quintero L. (Eds.) *La investigación edafológica en México 1992- 1995. Memorias XXVI Congreso nacional de la Ciencia del Suelo.* Cd. Victoria, Tamaulipas, México, p 86.
- ZAVALA, C. J, S. C. ORTÍZ A., T. E. OJEDA Y A. V. BOTELLO. 1996.** Contaminación del suelo por hidrocarburos en el campo Petrolero Samaria, Tabasco. p. 255- 264. In: A. V. Botello, J. L. Rojas- Galaviz, J. A. Benítez, D. Zárate - Lomeli (Eds). *Golfo de México, Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias.* Universidad Autónoma de Campeche. EPOMEX, Serie Científica, 666 p.
- ZAVALA, C., GUTIERREZ, C., D. J. PALMA-LÓPEZ (eds), 2003.** Impacto ambiental en las tierras del campo petrolero Samaria, Tabasco. Colegio de Posgraduados, Campus Tabasco- CCYTET - CONACYT, Villahermosa, Tabasco, p. 125.

- ZEDILLO, E., 1997.** Versión estenográfica de las palabras del presidente Ernesto Zedillo, durante la ceremonia en la que atestiguó la firma del Acuerdo de Coordinación para el desarrollo Industrial y el Ordenamiento Urbano Ecológico del Sur de Veracruz, entre Petróleos Mexicanos y el Gobierno del estado de Veracruz, así como de la suscripción del Anexo de Ejecución al Convenio de Desarrollo Social, Coatzacoalcos Veracruz, 14 de agosto de 1997. Fecha de consulta: octubre 2004
<http://zedillo.presidencia.gob.mx/pages/disc/ago97/14ago97-1.html>
- ZERMEÑO, L., H.R.URIBE, C.L.SALAZAR, R.A.CAMACHO, L.C.JAIMES, R.M.GUTIERREZ, E.E. ESCALANTE, M.M.GALLEGOS and GOMEZ, S.A. 2000.** Feasability studies and toxicity test for phytoremediation of soils contaminated with hydrocarbons. P.235-239. In: Lc.B6, Rojas N. and State of the art and perspectives. Proceedings. Instituto Mexicano del Petróleo. Petroleum Biotechnology Program México City.