



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES

"ESTRATEGIAS DE COLONIZACIÓN DE LAS
PLANTAS PARA LA RESTAURACIÓN DE JALES
DE MINAS, EN LA SIERRA DE CATORCE, S.L.P."

T E S I S

QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

MAESTRO EN CIENCIAS FORESTALES

P R E S E N T A:

MA. GUADALUPE FRANCO ISLAS

Chapingo, Estado de México, junio de 2005



**ESTRATEGIAS DE COLONIZACIÓN DE LAS PLANTAS PARA LA
RESTAURACIÓN DE JALES DE MINAS, EN LA SIERRA DE CATORCE,
S.L.P.**

Tesis realizada por **MA. GUADALUPE FRANCO ISLAS**, bajo la dirección del
Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito
parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

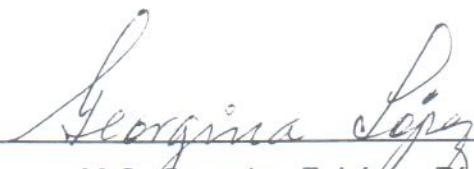
DIRECTOR:


Dr. Diódoro Granados Sánchez.

ASESOR:


Dr. Arturo Sánchez González.

ASESOR:


M.C. Georgina F. López Brios.

ASESOR:


M.C. Javier Santillán Pérez.

DATOS BIOGRÁFICOS

El autor del presente trabajo, es originario del Estado de Hidalgo y nació en 1968. Su instrucción Primaria la realizó en la Escuela “Javier Rojo Gómez” del Mpio. de Atotonilco el Grande Hgo., la secundaria en la Sec. Fed. “Jorge Viesca Palma”, ubicada en el mismo municipio, mi formación media superior en el Centro de Bachillerato Tecnológico e Industrial No. 5, en el Mpio. de Zacualtipán, Hgo., posteriormente mi carrera profesional la realicé en la Universidad Autónoma Chapingo, en la Ingeniería En Restauración Forestal, en la División de Ciencias Forestales.

Su experiencia profesional laboral fue iniciada en el año de 1988 en el Mpio. de Zacualtipán, Hgo., realizando actividades en una Unidad de Conservación y Desarrollo Forestal; desempeñando diversas actividades, especialmente en el Área económico administrativa; posteriormente trabajo en la evaluación de plantaciones forestales.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a las siguientes instituciones y personas que hicieron posible la realización de este trabajo

Al pueblo de México que por medio del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), me apoyaron económicamente para la realización de mis estudios de Maestría.

A la Universidad Autónoma Chapingo, en particular a la División de Ciencias Forestales por la confianza y apoyo recibidos para efectuar el programa de estudios.

Al Comité Asesor que dirigió la realización de este estudio, integrado por los siguientes profesores. Dr. Diódoro Granados Sánchez, Dr. Arturo Sánchez González y la M.C. Georgina F. López Ríos, todos ellos profesores que han contribuido a mi formación profesional, además por su amistad, colaboración y dedicación a la revisión de esta investigación.

A todos y cada uno de los profesores de la División de Ciencias Forestales, que directa o indirectamente contribuyeron a mi formación académica y personal.

A la Biol. Agustina Díaz Osorno, jefa del Herbario de Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo, por la identificación del material botánico recolectado.

Finalmente, a todas aquellas personas que considero mis amigos, que participaron de alguna manera durante mi estancia en la Maestría en Ciencias. Ana Luz Martínez Rodríguez, Andrés Flores García, Ma. Guadalupe Carrillo Benítez, Rogelio Coatzín Ramírez, Susana E. Ramírez Sánchez.

DEDICATORIA

**A MI MADRE
CON AMOR Y AGRADECIMIENTO**

**A MI HERMANA
CON CARÍÑO**

INDICE

	Página
AGRADECIMIENTOS	iv
DEDICATORIA	vi
INDICE	vii
ÍNDICE DE CUADROS	x
INDICE DE FIGURAS	xi
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo general	3
2.2 Objetivos específicos	3
3. ANTECEDENTES	4
3.1 Restauración ecológica	4
3.2 Impactos ambientales de la industria minera	7
3.3 Trabajos de restauración ecológica de la actividad minera	8
3.3.1 Trabajos de restauración ecológica de minas en México	13
3.4 Biorremediación de suelos contaminados por la actividad minera	14
3.4.1 Procesos de biorremediación	15
3.4.2 Técnicas de biorremediación de suelos	16
3.4.3 Procesos de biorremediación <i>ex situ</i>	17
3.5 Fitorremediación	18

3.5.1 Técnicas de fitorremediación	20
3.5.2 Trabajos de fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados	21
3.6 Sucesión ecológica	27
3.7 Estrategias de colonización de las plantas	29
3.8 Formas de vida	31
3.9 Ordenación	32
3.9.1 Técnicas de ordenación más usadas	33
4. MATERIAL Y MÉTODO	35
4.1 Área de estudio	35
4.2 Método	42
4.2.1 Delimitación del Área de Estudio	42
4.2.2 Trabajo de campo	42
4.2.3 Levantamiento florístico	42
4.2.4 Características generales del suelo	44
4.2.5 Clasificación con el análisis de agrupamiento	45
4.2.6 Índices de diversidad	45
4.2.7 Ordenación con el Análisis de Correspondencia Canónica	47
4.2.8 Formas de vida	48
4.2.9 Descripción fisonómico-estructural	49
4.2.10 Evaluación de las estrategias de colonización	49
4.2.11 Ordenación Triangular	51
5. RESULTADOS	53
5.1 Índices de diversidad	60
5.2 Análisis de semejanza	61
5.3 Ordenación directa	62

5.4 Formas de vida	66
5.5 Evaluación de las estrategias de colonización	68
5.5.1 Diagramas que representan la distribución de las especies de acuerdo a sus estrategias de colonización	71
5.6 Descripción botánica de las especies	75
6. DISCUSIÓN	105
7. CONCLUSIONES	112
8. BIBLIOGRAFÍA	116
9. ANEXOS	127

ÍNDICE DE CUADROS

		Página
Cuadro 1.	Estrategias de colonización de las plantas	50
Cuadro 2.	Sitios de muestreo en el jale de La Paz	53
Cuadro 3.	Familias, especies y formas de vida presentes en el área de estudio	54
Cuadro 4.	Listado de especies y su densidad total	55
Cuadro 5.	Densidad de individuos por especie en el sitio 1	56
Cuadro 6.	Densidad de individuos por especie en el sitio 2	57
Cuadro 7.	Densidad de individuos por especie en el sitio 3	58
Cuadro 8	Densidad de individuos por especie en el sitio 4	59
Cuadro 9	Densidad de individuos por especie en el sitio 5	59
Cuadro 10	Índices de diversidad para cada sitio de muestreo	60
Cuadro 11	Resultados del análisis de correspondencia canónica, valores de las raíces características, correlación entre las especies y los factores ambientales y el porcentaje de varianza, para los tres primeros ejes de ordenación	63
Cuadro 12	Correlación entre los tres ejes de la ordenación y las trece variables ambientales	64

ÍNDICES DE FIGURAS

	Página
Figura 1 Localización del área de estudio	35
Figura 2 Modelo de equilibrios entre competencia y restricciones	51
Figura 3 Dendrograma donde se muestran los sitios con mayor semejanza en composición de especies	62
Figura 4 Análisis de correspondencia canónica de 5 sitios de muestreo con 34 especies de plantas y 13 variables ambientales	65
Figura 5 Representación gráfica de los espectros biológicos en porcentaje	66
Figura 6 Climograma de la Estación Matehuala	67
Figura 7 Ordenación triangular de las especies herbáceas, anuales y perennes encontradas en el área de estudio	69
Figura 8 Diversos tipos de raíz de la especies analizadas	70
Figura 9 Diagramas de la distribución de las especies de acuerdo a su coeficiente y producción de R máx.	71

ESTRATEGIAS DE COLONIZACIÓN DE LAS PLANTAS PARA LA RESTAURACIÓN DE JALES DE MINAS, EN LA SIERRA DE CATORCE, S.L.P.

PLANT COLONIZATION STRATEGIES FOR THE RESTORATION OF MINING WASTE DEPOSIT AREAS IN SIERRA DE CATORCE, SAN LUIS POTOSÍ

Ma. Guadalupe Franco Islas¹

Diódoro Granados Sánchez²

RESUMEN

El principal impacto ambiental de la industria minera radica en la acumulación de desechos minerales. El objetivo de esta investigación fue describir y analizar las estrategias de colonización de la vegetación en jales mineros (zona en la que se depositan los desechos mineros) de la Sierra de Catorce, S. L. P., para proponer alternativas de restauración ecológica. En veinte parcelas de 16 m² se estimó la densidad y la forma de vida de las especies y algunas características edáficas. Los datos se analizaron con técnicas de clasificación numérica, de ordenación directa y de ordenación triangular. De las 15 familias encontradas *Asteraceae* fue la más representativa (14 especies) y la forma de vida predominante fue la caméfito. La clasificación permitió agrupar los sitios de muestreo de acuerdo con su composición de especies. La ordenación directa indica que hay correlación significativa entre la distribución de las especies y algunas variables ambientales. La estrategia de colonización de la mayoría de las especies fue C-S-R.

Palabras clave: jales de minas, estrategias ecológicas, caméfitos

ABSTRACT

The most serious negative effect of the mining industry on the environment has been its accumulation of mineral wastes. The objective of this research was to describe and analyze the colonization strategies of vegetation in zones in which mining wastes are deposited in the area of Sierra de Catorce, in the state of San Luis Potosí, to be able to then propose alternatives for ecological restoration. Species and their density, along with edaphic characteristics were taken into consideration in twenty 16 m² plots. The data were analyzed using numerical classification, direct ordination, and triangular ordination techniques. Among the 15 plant families found on the plots, *Asteraceae* was the most representative family (with 14 species), while the predominant life form was camephytic. Classification allowed the grouping of the different sampling sites according to their species composition. The direct ordination technique indicates that there is a significant correlation between the distribution of species and some environmental variables. The colonization strategy of most of the species was C-S-R.

Key words: mining wastes, ecological strategies, camephytic plants.

¹ Autor

² Director de Tesis

1. INTRODUCCIÓN

La minería ha sido el eje central de la actividad económica en diferentes regiones de México. En algunas zonas, como en la Sierra Gorda de Querétaro, existen vestigios de bocaminas que indican la explotación minera desde la época prehispánica. Durante la colonia, la minería tuvo su mayor auge en la extracción de metales preciosos, esto provocó que dicha actividad se expandiera a nuevos territorios (Sánchez y Sánchez, 1991).

La actividad minera causa impactos de orden físico como: contaminación por el ruido de las explosiones, compactación y contaminación del suelo, pérdida de la productividad de la tierra, destrucción del hábitat, contaminación de los mantos acuíferos y deterioro visual del paisaje. Además de impacto, social y económico, afectando grandes áreas de tierra donde la sucesión primaria es un proceso largo y lento, a menos que se realicen esfuerzos para la rehabilitación que aceleren la recuperación del ecosistema (Binkley, 1993).

La rehabilitación de minas (llamada también bonificación, saneamiento o restauración) es el proceso de conversión de tierras mineras para un uso valioso en el futuro (Gardner, 2001).

Uno de los problemas más importantes en México es la restauración ecológica a partir del impacto ambiental causado por la minería a través de los desechos de las minas denominados jales, pues no existe una metodología para realizar

dicha rehabilitación. Existen jales de minas con una antigüedad de más de 400 años, que a la fecha han reportado una escasa regeneración natural, como es el caso de los jales que se encuentran en la mina La Paz, en la Sierra de Catorce, S.L.P. Estos montículos, constituidos de toneladas de tierra contaminada producto de la extracción de minerales, provocan la contaminación de los mantos acuíferos, del suelo, la vegetación y la fauna. Adicionalmente, el viento provoca tolvaneras que acarrear los metales pesados que pueden provocar enfermedades al ser humano, y las escorrentías producto de las lluvias contaminan las tierras bajas.

En los jales mineros los principales problemas para la colonización de las plantas, se relacionan con la estructura física, con el déficit de nutrimentos y con las partículas finas del suelo. La superficie es lisa y no se acumula materia orgánica. Estas áreas deben de ser restauradas de acuerdo con los usos de las tierras circundantes, los requerimientos de la población y la protección de la biodiversidad (Garder, 2001).

El presente trabajo tuvo como objetivo analizar las estrategias ecológicas de las plantas colonizadoras en jales mineros, para obtener información básica para la rehabilitación de estas zonas, que en México permanecen en la actualidad como tierras ociosas y como fuente de contaminación por la alta concentración de metales pesados que afectan y deterioran el ambiente.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Describir y analizar las estrategias de colonización de la vegetación en jales de minas de la Sierra de Catorce, San Luis Potosí, para proponer mecanismos de restauración ecológica.

2.2 Objetivos específicos

Identificar las especies vegetales y sus estrategias ecológicas de colonización en jales de minas de la Sierra de Catorce, S. L. P.

Definir los atributos morfológicos y funcionales de las especies que les permiten establecerse durante las primeras etapas de la sucesión ecológica.

3. ANTECEDENTES

3.1 Restauración ecológica

La restauración ecológica es el conjunto de medidas y acciones encaminadas a reestablecer las condiciones ecológicas de los recursos naturales en un área determinada (Caro, 1993). Con la restauración ecológica se intenta recuperar las condiciones asociadas a los beneficios que genera el ecosistema tales como la cantidad y calidad del agua, la protección del suelo, la presencia de hábitats para la flora y fauna, el mantenimiento equilibrado de gases en la atmósfera y el rescate de espacios para la recreación. (Brañes, 1994). La restauración es un proceso sucesional natural de los ecosistemas; es decir, que se lleva a cabo a través de una serie de etapas progresivas que implican reemplazos de la vegetación y que generalmente requieren de un plazo mayor al del deterioro (Odum, 1995).

La restauración ecológica consiste en restablecer las comunidades naturales de un área dada de la forma más precisa y meticulosa posible, como una imitación de la naturaleza, lo que representa así una combinación novedosa entre agricultura y ecología (Díaz, 1995). Comprende una serie de acciones orientadas a recuperar la cobertura vegetal y devolver a los ecosistemas alterados, las condiciones que existían previamente (SEMARNAP, 1998).

La restauración ecológica se refiere al proceso de recuperar integralmente un ecosistema que se encuentra parcial o totalmente degradado en cuanto a su

estructura vegetal, composición de especies, funcionalidad y autosuficiencia, hasta llevarlo a condiciones semejantes a las que presentaba originalmente (Bradshaw, 1987; Ewel, 1987; Jordan *et al.*, 1987; Meffeé y Carroll, 1994).

La restauración ecológica es un sub-campo de la ecología cuyo objetivo es la restauración de especies y ecosistemas después de la perturbación humana (Ricklefs y Miller, 2000). Es un conjunto de actividades tendientes a la recuperación y reestablecimiento de las condiciones que propician la evolución y la continuidad de los procesos naturales; se considera como una ayuda que se brinda a la naturaleza para detener el proceso de degradación, guiando al sistema a través de una serie de etapas sucesivas para la recuperación de la composición de especies y las interrelaciones que tenía la comunidad original, en un tiempo relativamente corto (Tragsa y Tragsatec, 1998; Wall, 2000).

La restauración ecológica es un nuevo campo de estudio; constituye un complemento -no un sustituto- para desarrollar estrategias específicas de manejo de recursos naturales. Para ello, es necesario conocer parcialmente las condiciones originales del área en estudio, así como el impacto local generado por las actividades humanas. Los aspectos sociales que se deben de tomar en cuenta en los programas de restauración son tan importantes como las características ecológicas. Se debe prestar atención a la variedad de alternativas de restauración que brinden beneficios directos y apreciables a la sociedad (Swanson, 1994; Covington *et al.*, 2000).

Teniendo como premisa que los factores sociales y económicos influyen de manera significativa en el éxito de los trabajos de restauración o reforestación, se ha desarrollado una disciplina llamada ecología social que incluye métodos y conceptos de varias disciplinas académicas como ecología, antropología, sociología, geografía, psicología y ciencias políticas. Esta rama de la ecología pretende explicar y detectar las acciones antropogénicas que tienen impactos sobre los ecosistemas (Walters, 1997).

En los proyectos de restauración se debe incluir el factor humano, pues generalmente los disturbios en los ecosistemas son generados por el hombre. El éxito de las acciones dependen en gran parte del conocimiento y manejo de las actividades sociales, las cuales pueden mantener condiciones adecuadas o impedir la recuperación del hábitat. Además, la sociedad puede contribuir al aportar conocimiento empírico sobre el manejo de los ecosistemas (Walters, 1997).

La restauración debe tomar en cuenta el tiempo de formación del suelo (pedogénesis), de recuperación de la cubierta vegetal, de establecimiento de las relaciones bióticas y los costos económicos. Además, debe tomar en cuenta el contexto político y económico, pues puede ser un proceso caro o barato, dependiendo de los objetivos planteados (Granados, 2000).

Un ecosistema restaurado es biofísicamente funcional, capaz de adaptarse a variaciones en las condiciones ambientales y de mantener la identidad e integridad a través del tiempo. Se considera más eficiente que un ecosistema

sin restaurar, precisamente porque este último se encuentra en un estado degenerativo, en el cual, la energía no es retenida eficientemente dentro del ecosistema en forma de biomasa, sino que sale rápidamente.

El éxito en los trabajos de restauración depende de varios factores: del grado de compromiso establecido entre los actores involucrados, del grado de modificación de las características intrínsecas del ecosistema (elasticidad, resiliencia, resistencia, fragilidad, composición de especies, estructura y funcionalidad, entre otros) y de los aspectos prácticos del programa de restauración: presupuesto disponible, grado de deterioro y de la disponibilidad de especies, pues algunas pueden estar extintas localmente) (Márquez, 2003).

3.2 Impactos ambientales de la industria minera

La actividad minera, causa impactos de orden físico, social y económico. El impacto físico esta relacionado directamente con los sistemas ecológicos; el impacto social se refleja en la salud y calidad de vida de los trabajadores y de la población minera. La dependencia de ciertas localidades respecto a la minería, en función del mercado de trabajo y fuentes de ingresos constituye parte del impacto económico (Sánchez, 1991).

La actividad minera afecta grandes áreas debido a que la sucesión primaria es un proceso largo y lento, a menos que se realicen esfuerzos intensivos de rehabilitación que aceleren la recuperación del ecosistema (Binkley, 1993). El impacto de las instalaciones mineras depende de una serie de factores: tipo de

explotación, tipo de mineral explotado, método empleado para la obtención de los minerales, destino de los detritos del beneficio, escala de las operaciones y de la combinación de las características anteriores con el medio geográfico-físico (Sánchez, 1991).

Los jales son el resultado de la acumulación de residuos generados durante la concentración de mineral, a menudo pueden contener químicos y de esta manera contribuir a la contaminación de los mantos acuíferos cercanos y de las aguas superficiales. Los compuestos de sulfuro y los metales pueden también contaminar el agua. Además, los jales son una fuente de polvo dispersado por el viento (Payá, 1995; Cooke y Johnson, 2002).

Otros impactos incluyen la contaminación por el ruido de las explosiones y de otras operaciones mineras, la destrucción del hábitat, la pérdida de la productividad de la tierra y el deterioro visual del paisaje (Payá, 1995).

3.3 Trabajos de restauración ecológica de la actividad minera

El principal objetivo para el control de la erosión en las tierras dedicadas a explotaciones mineras es crear un medio constante sobre el que pueda establecerse una cubierta vegetal que permita la rehabilitación de estas tierras con fines agrícolas o recreativos (Morgan, 1997).

Los jales son terrenos donde la erosión se inicia con rapidez y donde la vegetación se desarrolla muy lentamente como consecuencia de la escasa fertilización e incluso de la toxicidad natural del suelo. Las estrategias de

regeneración deben incluir una combinación de métodos mecánicos y agronómicos: se requiere seleccionar las especies de la sucesión que proporcionen una adecuada cobertura y aumenten la fertilidad del suelo, esta selección dependerá de las condiciones locales del suelo y del clima. Idealmente se deben incluir gramíneas de crecimiento rápido, para que cubran y estabilicen la superficie tan pronto como sea posible; y leguminosas como el trébol, para la fijación de nitrógeno. La plantación puede realizarse en fajas o en líneas de contorno, para formar barreras a través de la ladera que reduzcan la escorrentía y el arrastre de sedimentos (Morgan, 1997).

Alexander (1990) menciona que para reducir los costos en la rehabilitación de jales de minas de estaño en el Joss Plateau, Nigeria, la minera "Mine Land Reclamation Unit" reforestó con *Eucalyptus* spp. cultivados para obtener leña y madera de construcción, pero con ello se originó un descenso significativo del pH del suelo que afectó el desarrollo de otras especies (Morgan, 1997).

Entre las medidas mecánicas es necesario construir terrazas y canales para controlar la escorrentía y dirigir el exceso de agua hacia sumideros y desagües situados en la base de las laderas. La regeneración de la vegetación puede complementarse con la construcción de empalizadas a nivel, fajas al contorno cubiertas con cortezas o residuos vegetales, o construcción de terrazas (Morgan, 1997).

Gardner (2001) describe la rehabilitación de minas de bauxita en el bosque de Jarrah en Australia Occidental: las actividades empezaron en 1966, en forma

rudimentaria se establecieron monocultivos de especies importadas de pino y eucalipto de Australia oriental. Sin embargo, los pozos de la mina no fueron nivelados, la capa de recubrimiento del suelo se esparció y se plantaron árboles con una cantidad arbitraria de fertilizante orgánico.

Griffith y Toy (2001) mencionan que en la restauración de minas de hierro en el estado de Minas Gerais, Brasil, que inició en 1977 y terminó en 1992, se utilizaron métodos de siembra hídrica con las especies *Brachiaria decumbens*, *Melinis minutiflora*, *Lolium multiflorum*, *Cajanus cajan*, *Dolichos lablab*, *Avena strigosa*, *Glycine wightii* y plantaron árboles de leguminosas, melastomatáceas, *Eucalytus* spp., *Pinus* spp. y *Casuarina* sp. También utilizaron tierra mezclada con fertilizantes, materia orgánica, semillas, diseñaron varias formas de dispersión de propágulos, instalación de perchas para aves y aplicaron residuos forestales.

Silva (1993) realizó la restauración de taludes muy inclinados en una mina de hierro en Conselheiro Lafaiete en Brasil, la técnica consistió en sujetar con estacas sacos de yute llenos con tierra, fertilizante, materia orgánica y semillas de *Brachiaria ruziziensis*, *Cajanus cajan* y *Stizolobium aeternum*, entre otras especies.

Sarrailh y Ayrault (2001) mencionan que es difícil lograr la restauración de la vegetación en los sitios que fueron minas de níquel, porque el suelo es infértil (carece de fósforo, potasio y nitrógeno), tiene una alta concentración de elementos tóxicos (níquel, y magnesio) y es muy vulnerable a la erosión. En

Nueva Caledonia la rehabilitación de los sitios que fueron minas de níquel comenzó en los años noventas y la llevó a cabo la SLN (Société Le Nickel) en 1993 y la SMSP (Société Minière du Sud-Pacifique) en 1997. Estas empresas emplearon la técnica de hidro-siembra, que utiliza una mezcla de materia orgánica, fijadores vegetales, nutrimentos, fertilizantes minerales y orgánicos y semillas de especies nativas.

Binkley (1993) sugiere que el establecimiento exitoso de las especies vegetales requiere de la aminoración de las condiciones tóxicas, del suministro de nutrimentos (si los materiales residuales no son fértiles), del establecimiento de la vegetación y del ciclo de nutrimentos. El reemplazo del humus original es una etapa importante, pero no suficiente para que se lleve cabo la rápida restauración del ecosistema. Las recomendaciones para la restauración deben ser específicas para cada sitio, pues dependen del tipo de minería, la mineralogía del material y el clima regional. Los problemas más comunes se relacionan con el pH muy bajo (favorece la toxicidad por metales) y con deficiencias de nitrógeno y fósforo.

Durante la actividad minera los compuestos de azufre reducidos, como la pirita de hierro, quedan expuestos a las condiciones aerobias. La acidez se produce cuando estos minerales se oxidan para formar ácido sulfúrico; el problema se puede corregir con aplicaciones de cal. Las aguas que drenan las minas abandonadas pueden tener una acidez muy alta (pH de 2) y elevadas concentraciones de metales tóxicos en la solución del suelo.

Binkley (1993) ha sugerido que en el proceso de rehabilitación de las minas el lodo de las aguas negras y la ceniza de las centrales eléctricas pueden ser valiosos para la nutrición de los árboles. Para el re-establecimiento de la cubierta vegetal es necesaria la inoculación con micorrizas, pues están ausentes en el material del subsuelo. Scharamm (1966) realizó la primera investigación al respecto en una mina abandonada en Kentucky: al inocular plántulas de *Pinus virginiana* logró aumentar la supervivencia de 2 a 45% y mejorar el crecimiento de las plantas.

Los jales sin cubierta vegetal generan problemas ambientales graves a las localidades adyacentes al impactar el agua, los bosques y el paisaje. En años recientes la investigación sobre la regeneración de los jales mineros ha sido objeto de considerable atención (Pritchett, 1986; Cooke y Johnson, 2002).

Czapowsky (1973) menciona que existen varias especies arbóreas que se adaptan a casi todos los tipos de jales y, en contraste, pocas especies de arbustos y hierbas que se adaptan a los sitios más adversos. Entre estas especies se encuentran *Vicia* spp., *Trifolium* spp., algunas gramíneas como *Festuca* spp., *Agrostis* spp. y *Avena* spp. También señala que mientras algunos jales pueden mantener el crecimiento vigoroso de algunos árboles sin ninguna preparación de campo o sin ninguna modificación del suelo, otros requieren de la construcción de terrazas o surcos de nivelación.

El funcionamiento de los ciclos de nutrimentos requiere de una gran diversidad de organismos. Los animales que habitan el suelo, por ejemplo, son

importantes en los procesos de descomposición y liberación de nutrimentos, pero la recolonización de los suelos rehabilitados puede ser lenta (Binkley, 1993).

3.3.1 Trabajos de restauración ecológica de minas en México

Hasta el momento se han realizado trabajos de restauración en el estado de Zacatecas, la Minera Peñoles realizó en el año 2001 una campaña de reforestación en zonas aledañas a las minas, plantó más de 1000 árboles utilizando materia orgánica. Este reporte es la primera experiencia en México de replantación a gran escala de especies vegetales en el desierto (Peñoles, 2001).

En Sonora, la Compañía Minera Peñoles (en la mina la Herradura) rescató y plantó más de 12 000 individuos de diferentes especies de cactáceas y arbustivas tales como la Sinita, el Sahuaro y el Palo fierro (Peñoles, 2001).

La Mina Francisco I. Madero localizada en un área semidesértica realizó en el 2001 una campaña de replantación de algunas de las especies existentes, entre las que resalta la Palma (*Yucca* sp.) (Peñoles, 2001).

Márquez (1999) evaluó los resultados de la aplicación de distintas estrategias de restauración en una zona afectada por la actividad minera de la industria del cemento en Ixtaczoquitlán, Veracruz. La restauración consistió básicamente en

la preparación del suelo, adición de tierra (cuando fue necesario), adición de estiércol de bovino como fertilizante y siembra de especies nativas y exóticas.

3.4 Biorremediación de suelos contaminados por la industria minera

Más de cuatrocientos años de actividad minera, en muchos casos sin interrupción, han dejado tras de sí montañas de residuos que contienen diversos materiales potencialmente tóxicos. Las poblaciones humanas, la flora y la fauna están expuestos a ellos a través del suelo, del aire y del agua. El peligro aumenta debido a la acumulación a través de los distintos niveles tróficos de la red alimenticia (Fernández *et al.*, 1998).

La minería es una de las actividades económicas de mayor tradición en México, contribuye en gran medida al desarrollo económico al suministrar insumos a una serie de industrias (construcción, metalúrgica, siderúrgica, química y electrónica). De acuerdo con la Dirección General de Minas, la industria minera en México es mayoritariamente metálica: el cobre, el zinc, la plata y el plomo son algunos de los más importantes (Fernández *et al.*, 1998).

En general, todas las etapas del proceso de producción minero (con excepción de la prospección, que implica estudios preliminares) generan problemas ambientales de alto impacto. En todas las etapas se generan aguas residuales, residuos peligrosos y, en algunos casos, emisiones a la atmósfera. Los dos procesos que producen mayor contaminación son la explotación de minerales y la fundición-refinación (Fernández *et al.*, 1998).

Una de las alternativas para contrarrestar los impactos causados por la industria minera es utilizar métodos de biorremediación o fitorremediación.

La biorremediación es el proceso mediante el cual, a través de determinados organismos, se logra la transformación de contaminantes químicos a compuestos inocuos para los seres vivos (González, 2004).

La biorremediación de suelos y aguas involucra tanto a bacterias, hongos y algas, como a plantas superiores (incluso árboles). Estos organismos metabolizan y degradan los compuestos orgánicos; son capaces de absorber compuestos inorgánicos tóxicos, inmovilizarlos e inhibir y/o catalizar diversas reacciones redox, lo cual amplía su efectividad (Abdelouas *et al.*, 1999, Raskin y Ensley, 2000).

La biorremediación es actualmente un área de gran atención y aplicación, tanto por el sector privado como el público, debido a su bajo costo y mínimo impacto ambiental. La biorremediación microbiana es efectiva para la degradación de contaminantes orgánicos pero poco eficiente para la eliminación de metales tóxicos y radio-nucleótidos de suelos contaminados. La única vía para recuperar o "remediar" estos suelos es la extracción o estabilización de los contaminantes (Huang *et al.*, 1998).

3.4.1 Procesos de biorremediación

Los procesos biológicos tienen gran importancia por el potencial que representan para la restauración de ambientes contaminados y se dividen en:

- **Biomineralización**: Es la eliminación de los contaminantes orgánicos mediante su reducción a constituyentes minerales básicos.
- **Biotransformación**: Los contaminantes orgánicos son parcialmente degradados a otras sustancias químicas menos complejas.
- **Biovolatilización**: Las bacterias y hongos pueden volatilizar metales por adición del grupo metilo, lo que hace al metal volátil.
- **Co-metabolismo**: Las bacterias son capaces de escindir el contaminante y así utilizarlo como fuente de carbono u otro elemento energético.

Muchos contaminantes orgánicos confinados, eventualmente se transforman o degradan y los sitios regresan a su estado natural (degradación natural). En el caso del tratamiento de los suelos la técnica depende de la factibilidad de aplicación, de la disposición de instalaciones especiales (sistemas de biorreactores) y de la posibilidad de acelerar los procesos biológicos específicos del suelo (Fernández *et al.*, 1998).

3.4.2 Técnicas de biorremediación de suelos

- **Bioaumentación**: adición de microorganismos al sitio contaminado cuando la población autóctona carece de la capacidad de degradación.

- **Bioestimulación**: adición de estimulantes para aumentar la actividad microbiana autóctona: co-sustratos o aceptores de electrones para la degradación anaerobia.
- **Bioventeo**: introducción de oxígeno al suelo para estimular la población microbiana netamente aerobia.
- **Composteo**: el material contaminado se coloca sobre la superficie del terreno en pilas que se cubren para crear condiciones termófilas, periódicamente se mezclan para aceleración la degradación.
- **Biocultivo**: tratamiento en fase sólida que se realiza generalmente en sitios confinados para retener los lixiviados que se forman.
- **Biosorción**: uso de microorganismos con afinidad para absorber metales bajo condiciones específicas, generalmente se realiza en fase líquida.

3.4.3 Procesos de biorremediación *ex situ*

- **En fase de lodos**. Los suelos se mezclan con agua (para formar lodo), microorganismos y nutrimentos.
- **Biodegradación en fase sólida**. Los suelos se colocan en una celda de tratamiento (composteo) o sobre membranas impermeables (biolabranza) y se agrega agua y nutrimentos (Fernández *et al.*, 1998).

Los residuos de los depósitos de minas superficiales a menudo son inestables y pueden provocar flujos de contaminantes. Los suelos contaminados con metales suelen carecer de materia orgánica y nutrientes lo cual inhibe el proceso de formación del suelo y el crecimiento de las plantas. En el caso de los metales pesados (Cu, Pb, Ni y Zn), afectan drásticamente la actividad y diversidad de los microorganismos edáficos (Wong, 2003).

3.5 Fitorremediación

La fitorremediación o fitorrecuperación es el uso de especies vegetales para contener, remover o neutralizar compuestos orgánicos, elementos traza o radionucleídos, que pueden ser tóxicos en suelos o aguas. Esta definición incluye cualquier proceso biológico, químico o físico, inducido por las plantas, que ayude en la absorción, secuestro, degradación y metabolización de los contaminantes, ya sea por las plantas o por los microorganismos que se desarrollan en la rizósfera (Raskin y Ensley, 2000).

Esta técnica, de reciente aplicación, utiliza la capacidad que poseen ciertas especies vegetales para acumular metales pesados y/o radionucleótidos en sus órganos. Es una forma rápida y barata de eliminar, disminuir o transformar estos contaminantes y con ella se evita el uso de reactivos químicos peligrosos y la erosión del suelo (Bailon, 1999).

La idea de utilizar especies de plantas con alta capacidad de acumular metales en sus tejidos fue propuesta por Chaney *et al.* (1983), pero se le dio mayor atención hasta 1990 (Curato *et al.*, 2005).

Existen dos opciones para la fitorremediación aplicables a los suelos contaminados por metales pesados: la fitoestabilización y la fitoextracción. La fitoestabilización se utiliza en suelos donde la alta concentración de contaminantes imposibilita la fitoextracción, se basa en el uso de plantas tolerantes a los metales que al absorberlos y acumularlos en sus raíces, tallos y hojas reducen su movilidad y disponibilidad para otras plantas o microorganismos (Raskin y Ensley, 2000; Wong, 2003).

La fitoextracción o fitoacumulación, es resultado de la absorción y traslocación de los metales desde las raíces hasta las partes aéreas de las plantas. Cuando el proceso finaliza las plantas se cortan e incineran o bien se acumulan con el objetivo de reciclar los metales. Las especies vegetales idóneas para este proceso deben poseer las siguientes características: ser tolerantes al metal que se desea eliminar (hiper-acumuladoras), que la acumulación se produzca fundamentalmente en la parte aérea, ser de rápido crecimiento y tener alta producción de biomasa aérea (Raskin y Ensley, 2000; Wong, 2003).

3.5.1 Técnicas de fitorremediación

Según FAUBA (1999) existen cinco clases de fitorremediación, con base en el tipo de interacción suelo-planta *in situ*:

1. **Fitoestabilización.** Las plantas en general previenen la migración de los contaminantes al reducir la erosión y al minimizar los movimientos del agua en el suelo (lixiviación o movimientos horizontales).
2. **Fitoextracción.** Las raíces de las plantas extraen los contaminantes del suelo y los traslocan hacia las partes aéreas en donde se acumulan. El material vegetal se cosecha y se compacta para almacenarlo, o se puede incinerar para recuperar los metales.
3. **Fitodegradación:** Algunos contaminantes, particularmente los orgánicos, al ser absorbidos y metabolizados por las plantas se degradan hasta formar moléculas inocuas.
4. **Fitoestimulación:** Las raíces secretan exudados (enzimas y ácidos orgánicos) que estimulan el crecimiento de diversas bacterias y hongos en la rizósfera.
5. **Fitovolatilización:** las plantas, al absorber el agua por las raíces, consumen también ciertos contaminantes que luego se liberan como gases inocuos durante los procesos de respiración celular.

Para que la vegetación que crece en zonas contaminadas por metales sea auto-sostenible es necesario utilizar especies vegetales que sean tolerantes a metales específicos, a la sequía y a la falta de nutrimentos. La adición de nutrimentos al suelo facilita el establecimiento y colonización de las plantas pioneras; la introducción de diferentes especies, aunado a la rotación de legumbres y especies nativas ayuda a restablecer la fertilidad del suelo y acelera la sucesión ecológica (Wong, 2003).

A diferencia de los compuestos orgánicos, los metales pesados no se remueven o neutralizan eficientemente con el uso de microorganismos, en cambio, varias especies vegetales son reconocidas como hiperacumuladoras de metales pesados (Bonetto, 2005).

3.5.2 Trabajos de fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados

Cornish *et al.* (1995) seleccionaron especies vegetales con capacidad hasta 100 veces mayor que otras plantas para acumular metales pesados. La selección de las especies se realizó en las instalaciones del Departamento de Energía de EEUU en Ohio y en una mina abandonada en Clancy, Montana. El uso de estas especies “hiperacumuladoras” se planteó como una técnica de bajo costo para la remediación de zonas extensas de suelos moderadamente contaminados (Abdelouas *et al.*, 1999).

En otra investigación Kumar *et al.* (1995) seleccionaron especies con mayor eficiencia en la traslocación de contaminantes hacia las partes aéreas de la planta (por ser las más fáciles de cosechar), *Brassica juncea* fue la que mejor se desempeñó en la absorción y traslocación de Pb, Cr, Cd, Ni y Zn. Los mecanismos que parecen estar involucrados en la acumulación y tolerancia a estos metales son la quelación extra e intracelular, la precipitación y la compartimentalización. Las vacuolas cumplen un papel muy importante en la acumulación de metales, se piensa que en su interior los iones metálicos son quelados por ácidos orgánicos como el citrato y el malato, y por isopéptidos llamados comúnmente fitoquelatinas (estos quelatos pueden estar relacionados con el transporte de los metales dentro de la planta).

Cuando la parte aérea de las plantas se cosecha (e incluso las raíces) se puede hacer composta y después secar o incinerar para disminuir el volumen de los contaminantes y almacenarlos, o bien recuperar los metales para reciclarlos (Kumar *et al.*, 1995).

Duschenkov *et al.* (1995) reportan que la eficiencia de remoción de metales pesados por plantas acuáticas como *Eichhornia crassipes*, *Hydrocotyle umbellata*, *Lemna minor* y *Azolla pinnata* (entre otras) es alta, pero la cantidad total removida es baja debido al pequeño tamaño de las plantas y a su lenta tasa de crecimiento tanto en biomasa aérea como sumergida (las raíces son la principal zona de acumulación). En contraste, los autores referidos indican que la eficiencia de acumulación de metales pesados en cultivos hidropónicos de

plantas no acuáticas como *Brassica juncea*, *Helianthus annuus* y algunas gramíneas es de hasta un 10% del peso seco de la raíz.

Dushenkov *et al.* (1995) definen tres procesos básicos involucrados en la remoción del plomo: el primero y el más rápido es la absorción por la raíz como producto de una combinación de procesos químicos y físicos como quelación, intercambio iónico y precipitación de iones metálicos. El segundo, más lento que el anterior, se relaciona con los procesos biológicos de traslocación y absorción intracelular (en la raíz y partes aéreas). El tercero, y también el más lento, es la precipitación del metal en la solución del suelo (principalmente como fosfato de plomo), un mecanismo ligado a los exudados de las raíces. Estos autores hacen hincapié en la importancia del estudio de la rizósfera y sus exudados, que además de proveer de carbohidratos a los microorganismos que viven en ella, secretan ácidos orgánicos quelantes y enzimas capaces de degradar contaminantes orgánicos.

En la fitorremediación de zonas afectadas por uranio se recomienda seleccionar especies conocidas por su capacidad de absorber y acumular metales pesados (la familia Brassicaceae reúne a muchas de estas especies). En este caso, se requiere conocer el contenido de uranio en las plantas, su posible fitotoxicidad y el mecanismo de absorción (traslocación y almacenamiento). Como es probable que las especies difieran sensiblemente entre sí en estos parámetros es esencial seleccionar las de mayor potencial remediador (Kumar *et al.*, 1995).

Goswani *et al.* (1997) registraron valores en un intervalo de entre 0.5 y 4.4 ppm de uranio (1.8 ppm en promedio) en plantas mesófitas y xerófitas en distintos hábitat en áreas no mineras, sin encontrar diferencias significativas en ambos grupos. Kabata y Pendias (1984) reportan valores de uranio de hasta 2.2 ppm en árboles y de 8 ppm en artemisas (*Artemisia* spp.) en las inmediaciones de una fábrica de fertilizantes fosfatados. Señalan también que las plantas absorben con mayor facilidad las fracciones solubles de uranio y torio del suelo.

Ribera *et al.* (1996) refieren que la absorción de uranio por las plantas está controlada por tres parámetros: **a)** deposición de partículas atmosféricas de uranio en las plantas y su retención. **b)** resuspensión de las partículas depositadas en las plantas o adheridas al suelo y **c)** absorción radicular del uranio y su migración hacia los tejidos internos. También mencionan cuales fueron las especies vegetales acuáticas con mayor capacidad de acumular uranio: *Ranunculus conferoides*, *Utricularia vulgaris*, *Myriophyllum spicatum* y *Potamogeton* sp.

Saric *et al.* (1995) realizaron un estudio sobre la absorción y acumulación de uranio en *Phaseolus vulgaris*, *Brassica oleracea*, *Lactuca sativa*, *Zea mays*, *Allium cepa*, *Solanum tuberosum*, *Spinacia oleracea* y *Helianthus annuus* sembrados en terrenos de la mina de uranio de Kalna-Gabrovnica, en Serbia. Aunque contaban con datos sobre absorción y contenido de uranio de las plantas nativas de estas zonas contaminadas, su objetivo fue conocer la respuesta en especies utilizadas para consumo humano. Al parecer la

concentración de uranio en las plantas depende de la localización de las mismas en la mina, de las propiedades del suelo y del agua en donde se desarrollan y del tipo de uranio disponible. Las especies nativas con mayor acumulación de uranio fueron *Shorea robusta*, *Emblica officinalis* y *Lagerstroemia parviflora*. *Brassica rapa* es un buen modelo para evaluar la fitotoxicidad del uranio, pues produjo semillas a concentraciones de 10 000 mg uranio/kg en cultivos con fitotrón. Los resultados de estos experimentos mostraron grandes diferencias en la absorción y acumulación de uranio entre especies y entre cultivares distintos de una misma especie, lo que sugiere la existencia de controles genéticos.

Saric *et al.* (1995) mencionan que la absorción y traslocación del uranio por las plantas se realizó con facilidad y que las plantas maduras presentaban más uranio que las plantas en estados vegetativos iniciales. El uranio se acumuló más en las hojas y otras partes aéreas que en los órganos de almacenamiento (bulbos, tubérculos, rizomas) y en las semillas. En ningún caso se observaron señales de fitotoxicidad.

En un experimento de rizofiltrado utilizando *Helianthus annuus*, *Phaseolus coccineus* y *Brassica juncea*, se seleccionó al girasol para la evaluación en campo por el alto contenido de uranio en sus raíces (99%). Es probable que la alta precipitación en la superficie de las raíces y la compartimentalización en las células radicales hayan prevenido la traslocación a las partes aéreas de las plantas (Dushenkov *et al.*, 1997).

En un estudio sobre la absorción y traslocación del uranio en cultivos hidropónicos de *Pisum sativum* Ebbs *et al.* (1998) determinaron que los iones uranilos libres fueron la forma de uranio mejor absorbida y que predominaron a pH de 5.5; este resultado sugiere que en suelos contaminados con uranio es conveniente la acidificación del suelo para aumentar la eficiencia de extracción de uranio por las plantas. En la segunda fase del estudio evaluaron la capacidad de absorción y traslocación de uranio con otras especies y seleccionaron a *Phaseolus acutifolius* y *Beta vulgaris* como las más eficientes. También evaluaron la eficiencia de absorción de uranio de individuos de *Beta vulgaris* cultivados en macetas con suelos tratados con distintos ácidos orgánicos.

El ácido cítrico fue el más efectivo para facilitar la extracción de uranio del suelo por su capacidad para disminuir el pH de 6.8 a 5.0 y de aumentar la solubilidad del uranio. La reacción que al parecer ocurre es la unión de complejos inorgánicos con el uranilo para formar compuestos temporales del tipo u-citrato que después son degradados por microorganismos de la rizosfera; los iones uranilos libres resultantes son absorbidos por las plantas. Este mecanismo debe estudiarse con mayor detalle, especialmente porque con el paso del tiempo el citrato puede formar complejos mucho menos solubles que los complejos inorgánicos de uranilo originales del suelo (Ebbs *et al.*, 1998).

Huang *et al.* (1998) realizaron experimentos en los que utilizaron varios ácidos orgánicos para conocer la solubilidad de los iones uranilo en las partículas del

suelo. La mayor solubilidad e hiperacumulación de uranio en *Brassica juncea* y *Brassica chinensis* se produjo con el ácido cítrico. La acción del ácido cítrico estuvo relacionada con la acidificación del suelo y con la quelación del mismo con uranio y permitió también la desintegración de los sesquióxidos de hierro y aluminio que cubrían al uranio. Después de aplicar por varios años el ácido cítrico se concluyó que el suelo no presentaba problemas de formación de compuestos insolubles.

3.6 Sucesión ecológica

Mosley (1959) menciona que la sucesión es el reemplazo de una comunidad biótica por otra. Es un proceso que implica patrones no estacionales, direccionales y continuos de colonización y extinción de poblaciones de distintas especies (Berger, 1993; Matlac, 1994; Begon *et al.*, 1996).

Odum (1995) define a la sucesión como un conjunto de comunidades que se substituyen una a otra en un área determinada en el tiempo y las designa como "sere", en tanto que las comunidades relativamente transitorias se designan como etapas serales de desarrollo o exploración y el sistema estabilizado final se designa como "clímax". La sucesión implica el reemplazo de una asociación de especies por otra, las especies recién llegadas ocupan una posición media entre la vegetación inicial y la final (Ugalde, 2004).

La sucesión ecológica es el marco conceptual en el cual se basa la restauración. Los ecosistemas o comunidades que han sido degradados llevan

a cabo por sí mismos procesos de recuperación, que son parte del proceso de sucesión. El conocimiento de los procesos de sucesión de los diversos ecosistemas, permite proponer diferentes enfoques para realizar una restauración ecológica con éxito (Granados y López, 2000).

La sucesión se entiende como el camino hacia la formación en la que se establecen fenómenos de competencia, establecimiento, supervivencia y dominancia, aunado a la dependencia de las interacciones y de las influencias modificadoras de los organismos vivientes que constituyen la comunidad (Granados, 2000).

La recuperación de un ecosistema después de un disturbio esta fuertemente influenciado por la “disponibilidad u oportunidad” de las plantas colonizadoras y de las especies que quedan dentro y en los alrededores del área; estas especies determinan la velocidad de recuperación del ecosistema. Como las especies están en constante evolución y movimiento (migración), la estructura de las comunidades es dinámica en el tiempo y en el espacio. Es por ello que la restauración ecológica debe basarse en estrategias que consideren la estructura, composición y funcionalidad de los ecosistemas, en donde esta implícita la necesidad de proporcionar condiciones favorables a las especies nativas (Wagner *et al.*, 2000; en Gutiérrez, 2002).

En la restauración se pone a prueba una de las teorías más importantes de la ecología: la sucesión. Implica también reconocer procesos como la sucesión primaria y secundaria, los diferentes mecanismos de invasión de las especies,

la importancia del banco de semillas en la regeneración de comunidades, la identificación de especies clave durante la sucesión, su comportamiento demográfico, el papel que desempeñan las perturbaciones en la estructura de una comunidad y la dinámica de los ciclos biogeoquímicos (Granados, 2000).

El conocimiento de los fenómenos antes mencionados permite identificar los factores más relevantes del proceso y su posterior manipulación para acelerar las vías de la sucesión que conduzcan a la recuperación de una composición e interacción de especies semejantes a las del ecosistema original (Granados, 2000).

3.7 Estrategias de colonización de las plantas

Grime (1982), Define una estrategia como el agrupamiento de características genéticas semejantes o análogas que ocurren ampliamente entre las especies o poblaciones y hacen que las mismas exhiban semejanzas ecológicas.

Łaska (2001) menciona que el triángulo de Grime y la teoría de las estrategias C-S-R se refiere a disturbios tales como el estrés y la competencia y los define como fenómenos que pueden producir cambios en la estrategia de vida de las especies cuando llegan a un sitio, en respuesta a la variación de las condiciones ambientales.

El tamaño del área afectada, la duración, la frecuencia o la intensidad determinan el grado de disturbio y definen las características biológicas de los

individuos: la estrategia de vida que usan para colonizar un sitio determinado y garantizar una reproducción exitosa (Łaska, 2001).

Grime (1988) sustenta que existen dos factores que limitan la biomasa de las plantas: el estrés y la perturbación, a partir de esto elaboró una tabla de contingencias de la intensidad del estrés contra la intensidad de la perturbación.

Łaska (2001) describe los tipos de estrategias de Grime y las divide en:

Estrategias primarias de las plantas

- C Estrategia competidora (bajo estrés con bajo disturbio).
- S Estrategia tolerante al estrés (alto estrés con bajo disturbio).
- R Estrategia ruderal (bajo estrés con alto disturbio).

Estrategias secundarias en las plantas

- C-R Ruderales competidoras.- Plantas adaptadas a circunstancias en donde hay bajo impacto de estrés y la competencia esta restringida por una intensidad moderada de disturbio.
- C-S Competidoras tolerantes al estrés.- Plantas adaptadas a condiciones sin disturbio: que experimentan intensidades moderadas de estrés.

S-R Ruderales tolerantes al estrés.- Plantas adaptadas a alto disturbio y a hábitat improductivos.

C-S-R Plantas confinadas a hábitat en los que la competencia esta restringida por intensidades moderadas, por la combinación de efectos de estrés y disturbio.

Algunas especies tienen mecanismos particulares para dispersarse a largas distancias. Las especies colonizadoras de hábitat vacíos tienen que salvar en primer lugar, la barrera de la distancia, superar lo impredecible de la localización y la transitoriedad del nicho; adaptaciones que han sido favorecidas por la selección natural para superar estos obstáculos (Granados, 2000).

3.8 Formas de vida

La forma de vida, también denominada forma de crecimiento o tipo biológico, es en general la estructura que presenta una especie producto de las condiciones ambientales y de las estrategias adaptativas y evolutivas de las plantas. Cada forma de vida se distingue de otra por características tales como su posición en los estratos de la comunidad, el tipo de ramificación, la periodicidad, el tipo de hojas (Granados, 1990).

Las formas de vida se clasifican de acuerdo a diversos autores:

- Raunkiaer. Este sistema se basa en el comportamiento de las especies durante la estación desfavorable y la clasificación toma en

cuenta la posición de las yemas de renuevo o meristemas con respecto a la superficie del suelo (Granados, 1990).

- Ellemberg y Mueller-Dombois (1966) retoman la clasificación de Raunkiaer, establecen varias divisiones considerando el carácter autótrofo o heterótrofo de las plantas y la distinción entre plantas vasculares y talofitas (Granados, 1990).
- En el sistema de Braun Blanquet la clasificación es muy parecida a la de Raunkiaer pero considera tanto a las plantas fanerógamas como criptógamas.
- La clasificación de Durietz (1931) sólo toma en cuenta las características fisonómicas y estructurales de las plantas (Granados, 1990).

3.9 Ordenación

El término ordenación significa el arreglo de muestras de vegetación en términos de su semejanza en la composición de especies y con base en los controles ambientales asociados (Kent y Coker, 1992). Pretende reducir patrones complejos de datos a formas más simples e interpretables arreglando las muestras y/o las especies a lo largo de uno o más ejes continuos (Kershaw, 1973). Los ejes de una ordenación pueden ser construcciones puramente matemáticas derivadas de una matriz de semejanza entre las muestras o

especies (ordenación indirecta), o representar gradientes ambientales (ordenación directa). Cuando se tienen datos de variables como los nutrientes del suelo, la altitud, la pendiente u otras, el objetivo es encontrar una combinación de atributos que pueda sugerir una causa fundamental para el patrón sistemático de la distribución de las especies en las muestras (Sánchez, 1998; McCune y Grace, 2002).

La ordenación es considerada como sinónimo de análisis de gradientes. Se reconocen tres tipos de gradientes ambientales (Austin y Smith, 1989):

- a) Gradientes indirectos, aquellos que no tienen una relación directa con los organismos, involucran la presencia de otros factores (por ejemplo la altitud que tiene una correlación sitio-específica con la humedad y la temperatura las cuales si tienen efecto directo sobre el crecimiento).
- b) Gradientes directos, con un impacto fisiológico directo en el crecimiento vegetal pero no son consumidos por los organismos (temperatura, pH, porosidad del suelo).
- c) Gradientes de recursos, el factor ambiental es consumido como recurso para su crecimiento (oxígeno, agua, nutrientes del suelo).

3.9.1 Técnicas de ordenación más usadas

CA (Análisis de Correspondencia). Técnica de análisis de gradiente indirecta (forma lógica de descubrir factores determinantes de la estructura de la

comunidad) que permite ordenar muestras y especies de manera simultánea (Palmer, 1993).

CCA (Análisis de Correspondencia Canónica). Es una técnica de ordenación directa que representa además un caso especial de regresión multivariable. Se efectúa una regresión lineal múltiple (método de mínimos cuadrados) tomando los coeficientes para las muestras como la variable dependiente y las variables ambientales como variable independiente. Los nuevos coeficientes para las muestras se asignan conforme al valor predicho por la ecuación de regresión. Dado que esta ecuación es formalmente una combinación lineal de variables, se pueden determinar los nuevos coeficientes para las muestras. El fundamento es que la abundancia o frecuencia de una especie tiene una distribución unimodal a lo largo de un gradiente ambiental. Este modelo es inapropiado para gradientes extremadamente cortos, en los cuales la abundancia o frecuencia de las especies es una función lineal monotónica del gradiente (Ter Braak y Šmilauer, 1998).

4. MATERIAL Y MÉTODOS

4.1 Área de estudio

El área de estudio comprende los jales de la Mina de La Paz, en la Sierra de Catorce, San Luis Potosí. La Sierra de Catorce se localiza entre los $23^{\circ} 24'$ - $24^{\circ} 47'$ latitud norte y los $100^{\circ} 46'$ - $100^{\circ} 57'$ longitud oeste. El municipio de Real de Catorce tiene una superficie de $1\,178.6\text{ km}^2$, sus colindancias son al norte con el municipio de Venegas, al este con el de Villa de la Paz, al oeste con el de Santo Domingo; al suroeste con el de Charcas y al noroeste con el estado de Zacatecas (Los municipios del Estado de San Luis Potosí, 1988).

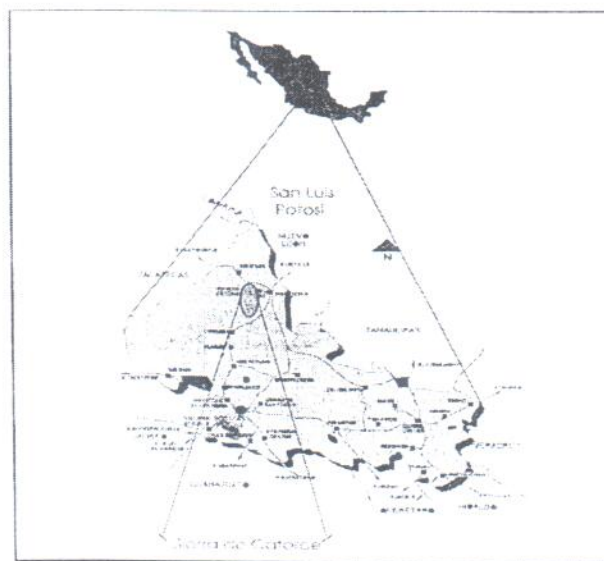


Figura 1. Localización del área de estudio Sánchez (1998).

La Sierra de Catorce se encuentra en la zona noreste del Altiplano Potosino-Zacatecano, forma parte de las sierras inferiores de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Oriental y ocupa una franja que cubre de norte a sur el

municipio de Real de Catorce (CETENAL, 1970). La altitud en la cabecera municipal es de 2 756 m, el intervalo altitudinal en la zona varía desde los 1 800 a los 3 110 m. Los cerros al norte de la Sierra, como Puerto del Aire tiene una altitud de 3 040 m y la Descubridora de 3 020 m; al sur se localiza el Cerro Barco con 3 060 m, que es uno de los más altos de la Sierra Madre Oriental (Medina-Rivero, 1983).

Población

El área cuenta con 69 localidades de más de 25 habitantes, siendo las más importantes Real de Catorce, Estación Catorce y Estación Wadley. La población total es de 11 997 habitantes (INEGI, 1990), su tasa de crecimiento anual es de 0.75 por ciento; su densidad de población es de 10 habitantes por kilómetro cuadrado.

Actividades Económicas

Agricultura: los cultivos de mayor importancia por superficie cosechada son: alfalfa, maíz, frijol, sorgo, cebada y jitomate. La agricultura es principalmente de temporal con 6 541 ha (83%), 537 ha son de riego y temporal (7%) y únicamente 822 ha son de riego (10%) (INEGI, 1994).

Ganadería: Las especies más importantes son: caprinos, porcinos, bovinos y ovinos. La superficie dedicada a la ganadería es de aproximadamente 135 488 has, de las cuales 135 238 son pastizales y matorrales naturales (INEGI, 1994).

Industria: Existen a nivel familiar y se trabaja por temporadas.

Minería: La compañía Minera y Refinadora Mexicana, S. A., y la Restauradora de Minas Catorce, S.A. de C.V., aunque al parecer dejaron de trabajar recientemente pues a partir de 1990 cesó la producción de oro, en 1991 no se registró explotación de plomo y en 1992 no hubo producción de plata. Actualmente es importante la explotación de antimonio (INEGI, 1995).

Clima

El clima se clasifica según García *et al.*, (1985) como BS₁ kw (x') hacia delante, es decir, semiárido (BS₁), templado (k), lluvias de verano con alto porcentaje de precipitación invernal w(x') y extremoso hacia delante, con oscilación de las temperaturas medias mensuales entre 7 y 14°C.

La precipitación media anual en la zona es baja: 306.4 mm, la precipitación máxima se presenta en mayo, julio y septiembre; la evaporación es muy alta ya que alcanza un promedio anual de 2 010 mm, la evaporación máxima se registra entre marzo y julio; el periodo de heladas se presenta por lo general a finales de septiembre, hasta marzo. La temperatura media anual oscila entre los 15.1° y 17.7° C, el promedio es de 16.5° C (Sánchez, 1998).

Hidrología

Los principales ríos son: La Maroma, El Jordán, El Pilar y El Chiquito; existen algunos otros ríos de importancia, aunque la mayoría de las veces no llegan a

las corrientes principales desapareciendo por infiltración y evaporación, por ello el único medio de contar con agua son los mantos acuíferos (Torres, 1979; Carrizales, 1985)

Geomorfología

La zona se encuentra en un estado de madurez temprana, con formas topográficas que van de relativamente suaves a moderadamente abruptas, en donde predominan los factores físicos sobre los químicos (Torres, 1979; Carrizales, 1985)

La topografía de la Sierra de Catorce es accidentada, en las partes altas dominan las pendientes de más del 30%, con las menos de 10% en las laderas inferiores. En general las laderas presentan exposiciones hacia el noroeste. El área donde se localiza la Sierra esta formada por serranías alargadas en sentido norte-sur, separadas por cuencas endorreicas y valles de contornos irregulares. La mayoría de los anticlinales forman las principales sierras y los sinclinales las cuencas (Sánchez, 1998).

Las serranías y cuencas forman un paisaje en donde abundan las calizas; los valles están cubiertos por una capa de aluvión cuyo máximo espesor es de alrededor de 100 m y de composición variable, principalmente formado por grava, arena y arcilla. En algunas zonas el aluvión tiene alto contenido de material yesífero (Murphy, 1966; Humara, 1967; Carrizales, 1985).

Geología

Se encuentran expuestas rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas, cuyas edades se les ha estimado del Triásico al Reciente, las rocas son en su mayor parte sedimentarias, mesozoicas, continentales y marinas; y pertenecen al Triásico, Jurásico y Cretácico.

Suelos

Los suelos en el área son en general jóvenes de poca profundidad, como sucede en otras zonas. Los perfiles más desarrollados son los del grupo de los xerosoles y se caracterizan por la presencia de sales, este suelo se presenta en las partes bajas de las cuencas donde, debido al drenaje endorreico y a la acumulación de material arcilloso se provoca la deficiencia de drenaje y se impide la lixiviación de los perfiles, lo que favorece la acumulación de sales.

Otro tipo de suelos son los litosoles con fase petrocálcica, que se encuentran relacionados estrechamente a elevaciones, donde el material rocoso esta cerca de la superficie o se encuentra aflorando, la característica principal de estos suelos es su poca profundidad. En menor proporción se encuentra el fluvisol calcáreo con fase dúrica. Ambos son de textura media (Murphy, 1966; Humara, 1967; Hernández *et al.*, 1988).

Vegetación

Los tipos de vegetación característicos de la zona fueron descritos por Rzedowski (1965). En las partes bajas sobre sustrato aluvial, se presenta matorral desértico micrófilo; sobre sustrato ígneo, matorral crasicaule; en las laderas sedimentarias se encuentra el matorral desértico rosetófilo y en las laderas ígneas el encinar arbustivo, bosques de piñoneros y matorral crasicaule. Ver Sánchez (1998) y Sánchez y Granados (2003) para una descripción más detallada de los tipos de vegetación de la Sierra de Catorce.

Matorral desértico micrófilo. Crece en las partes bajas de los cerros sobre suelos de origen aluvial, se caracteriza por la presencia de arbustos de pequeñas hojas como: *Larrea tridentata*, *Flourensia cernua*, *Prosopis laevigata*, otras especies como: *Yucca filifera* y *Parthenium incanum*.

Matorral desértico rosetófilo. Se localiza en las laderas de los cerros con sustrato sedimentario. Se caracteriza por las especies arbustivas y subarbustivas con hojas alargadas y estrechas, agrupadas en forma de roseta como: *Agave lechuguilla*, *A. Striata*, *Yucca carnerosana*, *Dasylium leiophyllum*, *Opuntia stenopetala* y *Ephedra aspera* (Sánchez, 1998).

Matorral crasicaule. Se presenta en laderas y planicies con suelos de origen ígneo. Este tipo de vegetación esta representada por los géneros *Opuntia* y *Myrtillocactus* (Sánchez, 1998).

Zacatal. Crece en suelos de origen ígneo, aluvial o calizo, en relieves llanos, dominan las gramíneas y herbáceas, las especies cambian de acuerdo al sustrato, las más comunes son: *Bouteloua spp.*, *Aristida divacariata*, *Andropogon hirtiflorus* y *muhlenbergia repens* (Sánchez, 1998).

Encinar arbustivo. Se desarrolla sobre suelos de origen ígneo o calizo y las especies dominantes son del género *Quercus* (Sánchez, 1998).

Piñonar. Crece sobre suelos ígneos y sedimentarios, esta caracterizado por la presencia de pino piñonero: *Pinus cembroides*, otras especies son: *Arctostaphylos pungens*, *Dodonaea viscosa* y *Castilleja tenuiflora* (Sánchez, 1998).

4.2 Método

4.2.1 Delimitación del Área de Estudio

La zona se delimitó y caracterizó por:

- a) Revisión bibliográfica de la zona.
- b) Revisión cartográfica: carta edafológica, topográfica, geológica, uso del suelo, uso potencial y de vegetación (escala 1:50 000)

4.2.2 Trabajo de campo

Se realizó una visita con el propósito de conocer el área de estudio y de obtener la primera colecta de las especies vegetales presentes; se tomaron datos cualitativos y cuantitativos de la vegetación (forma de vida, presencia, densidad).

El trabajo de campo continuó durante la temporada de lluvias, se colectaron las especies vegetales presentes en los sitios de muestreo, se anotaron datos sobre la fenología de las plantas y se colectaron muestras de suelos. Se colectaron en total cinco muestras de suelo, una para cada sitio de muestreo.

4.2.3 Levantamiento florístico

Se eligieron cinco sitios de muestreo: uno para cada punto cardinal (terraplén) y uno en la parte superior del jale (parte plana). En cada sitio se colocaron al azar

cinco cuadros de 4 x 4 m. El número total de unidades de muestreo fue de 20 parcelas.

En cada parcela se cuantifico el número de especies presentes y se colectaron dos ejemplares de cada especie. Se procuró que los individuos estuvieran completos (órganos y frutos). Se colectaron en total 34 especies, para cada una se registró la siguiente información:

- ❖ Características generales de cada planta: forma de vida, tipo de raíz, color de la flor, forma del fruto, forma del tallo, altura de la planta, forma de la semilla (si era el caso).
- ❖ Micrositios de germinación o “sitios seguros”: Son zonas en las cuales se encuentran condiciones apropiadas para la germinación y la supervivencia de las plantas. Estos sitios proveen además de estímulos para desbloquear la latencia y favorecer la germinación, de refugios contra predadores, competidores, patógenos y toxinas.
- ❖ Nombre común (si se conocía).
- ❖ Las especies colectadas fueron identificadas por la Bióloga Agustina Díaz Osorno, en el Herbario de Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo.

4.2.4 Características generales del suelo

La determinación de las características edáficas se realizó en el Departamento de Suelos de la Universidad Autónoma Chapingo, se determinaron las siguientes propiedades:

Físicas

- Densidad aparente (método de la probeta).
- Densidad real (método del picnómetro).
- Textura (método del hidrómetro de Bouyoucos).

Químicas

- Materia orgánica
- pH (potenciómetro, relación suelo-agua 1:2)
- Capacidad de intercambio de cationes (acetato de amonio 1 N, pH 7.0, por centrifugación).
- Calcio (Ca) y Magnesio (Mg) intercambiable (extraído en acetato de amonio 1 N, pH 7.0, en relación 1:20 y determinado por espectrofotometría de emisión de flama).

- Sodio (Na) intercambiable (espectrofotometría de emisión de flama en el extracto de la pasta de saturación).
- Contenido de Metales pesados: cobre (Cu), plomo (Pb) y plata (Au).

4.2.5 Clasificación con el análisis de agrupamiento

Para estimar la semejanza en la composición de especies entre los sitios de muestreo se realizó la clasificación numérica con datos de presencia-ausencia, por medio del análisis de agrupamiento. Como medida de semejanza se eligió el índice de Jaccard y como método de unión de grupos, promedio entre grupos. El análisis se realizó con el programa de cómputo PC-ORD versión 4.1 (McCune y Mefford, 1999).

4.2.6 Índices de diversidad

Para estimar la diversidad de especies se utilizaron dos índices:

- **Índice de diversidad de Shannon-Weiner.**

$$H' = -\sum p_i \log_2 p_i$$

Donde:

H' = Diversidad (bits / individuo)

p_i = Proporción del número de individuos de la especie i con respecto al total de individuos de todas las especies (n_i/N).

Este índice toma en cuenta los dos componentes de la diversidad, el número de especies y la equidad o uniformidad de la distribución del número de individuos de cada especie. Un mayor número de especies aumenta la diversidad y además una mayor uniformidad también lo hará (Franco, 1985; Magurran, 1988).

• Índice de diversidad de Simpson

Este índice se basa en la probabilidad de seleccionar al azar dos individuos de especies diferentes.

$$D = \frac{1}{\sum_{i=1}^s (p_i)^2}$$

Donde:

D = Índice de diversidad de Simpson

p_i = Proporción de individuos de la especie i en la comunidad.

El índice de Simpson concede poca importancia a las especies raras (poco abundantes) y mayor importancia a las especies abundantes, por ello se considera un índice de dominancia. El intervalo de valores que puede tomar el índice varía de 0 (diversidad baja) hasta $1-1/S$, en donde S es el número de especies (Krebs, 1987; Magurran, 1988).

4.2.7 Ordenación con el análisis de Correspondencia Canónica

Para conocer la relación entre la composición de especies en los sitios de muestreo y las variables ambientales consideradas se realizó el Análisis de Correspondencia Canónica (CCA), con los programas de computo CANOCO versión 4 (Ter Braak y Šmilauer, 1998) y PC-ORD versión 4.1 (McCune y Mefford, 1999).

El CCA permite separar las especies según sus nichos ecológicos y construye gradientes sintéticos de ordenación. Estos gradientes pueden concordar con gradientes ambientales, con alguna combinación de diferentes factores ambientales o representar variables no consideradas en el análisis (Sánchez, 1998).

El CCA posiciona las especies, los sitios y los factores ambientales en un sistema de coordenadas que representan los gradientes principales. El grado de poder explicativo de los gradientes se expresa por medio de sus raíces características (eigenvalues). La localización de los sitios en el sistema de coordenadas corresponde a la media ponderada (centroide) con cero en el origen de las coordenadas (Zero Wiegthed Mean), y la varianza unificada (Unit Weighted Variante). Las especies se ubican de acuerdo a su incidencia en los sitios, los factores ambientales cualitativos se posicionan por sus medias ponderadas (centroides), mientras que los factores ambientales cuantitativos se ubican por sus correlaciones vectoriales con los ejes principales ((Ter Braak y Šmilauer, 1998). Con este análisis se busca el desarrollo de un modelo más

comprensible del estatus que guardan las comunidades entre sí y los factores ambientales que las están limitando.

Para elegir las variables ambientales y edáficas más correlacionadas con la composición de especies y evitar la redundancia (debido a correlaciones entre las mismas variables explicativas), se utilizó el criterio de selección "hacia delante" del programa CANOCO (Ter Braak y Šmilauer, 1998; McCune y Grace, 2002).

4.2.8 Formas de vida

Para la determinación de las formas de vida se utilizó el sistema de Raunkiaer. La forma de vida se identificó con base en la altura a la que se encontraban las yemas de renuevo de la planta. La clasificación fue la siguiente (Granados, 1990).

Terófitas (h). Plantas anuales que sólo viven en la época más favorable en la cual, florecen, fructifican y después mueren dejando, durante la época desfavorable, semillas que germinaran en el siguiente año.

Nanófitas (G). Plantas cuya parte aérea muere año tras año y subsisten mediante bulbos, tubérculos o rizomas. Por ende, la yema se encuentra cubierta por tierra (yemas subterráneas).

Hemicriptófitas (H). Las yemas de renuevo se encuentran al ras del suelo, el aparato aéreo es herbáceo y desaparece en parte al inicio de la estación

desfavorable. Se presentan gran variedad de formas (rosetas o las que poseen rizomas rampantes).

Caméfitas (Ch). Plantas con la parte inferior leñosa y persistente, las yemas de renuevo se encuentran a menos de 30 cm por encima del suelo, sobre brotes aéreos cortos, rastreros o rectos.

Nanofanerófitas (Ph). Arbustos altos, mayores de 30 cm de alto.

Microfanerófitos (Mf). Árboles de 2 a 8 m.

4.2.9 Descripción fisonómico-estructural

En esta descripción el objetivo es realizar una representación gráfica de la comunidad que permita la comparación visual. Se optó por el espectro biológico, el cuál es un gráfico de barras en el que representa el porcentaje de especies pertenecientes a cada forma de vida, según el sistema de clasificación de Raunkiaer (Matteucci, 1982).

4.2.10 Evaluación de las estrategias de colonización

Para evaluar las estrategias de colonización de las plantas en los jales de minas se recurrió a la recopilación de información bibliográfica de cada especie.

La evaluación se realizó de acuerdo a las estrategias de las plantas en la fase primaria, haciendo referencia al equilibrio entre restricción, alteración y competencia de acuerdo con Dansereau y Grime (1982).

Cuadro 1. Estrategias de las plantas (Grime, 1982).

INTENSIDAD DE LA PERTURBACIÓN	INTENSIDAD DE LAS RESTRICCIONES	
	BAJA	ALTA
BAJA	COMPETIDORAS	TOLERANTES A LAS RESTRICCIONES
ALTA	RUDERALES	SIN ESTRATEGIA VIABLE

Una vez que se obtuvo la categoría de cada especie colectada se elaboró un modelo triangular para situar a las especies dentro del triángulo propuesto por Grime (1982).

El modelo consiste en un triángulo equilátero en el que las variaciones en la importancia relativa de la competencia, la restricción y la alteración son determinantes de los tipos de vegetación. En las esquinas del triángulo las especies competidoras, las tolerantes a las limitaciones y a la perturbación se convierten en constituyentes exclusivos de la vegetación. Las áreas restantes del triángulo corresponden a diferentes estados posibles de equilibrio entre la competencia, la restricción y la perturbación.

Este modelo describe los diversos equilibrios entre competencia, restricción, alteración de la vegetación y la localización de las estrategias primarias y secundarias.

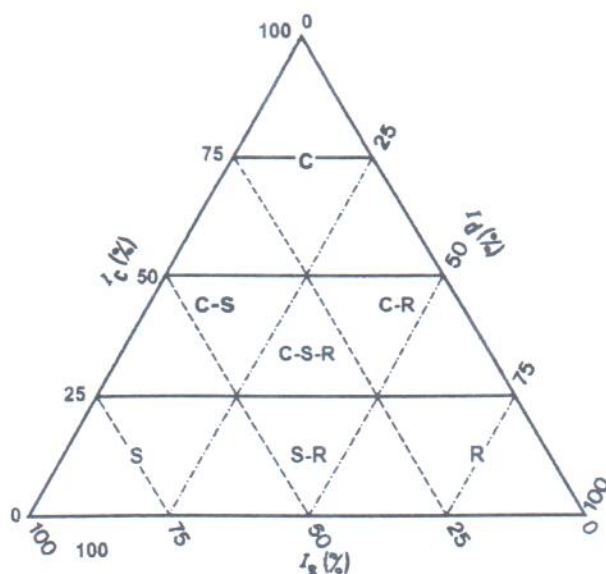


Figura 2. Modelo de equilibrios entre competencia y restricción (Grime, 1982).

I_c : importancia relativa de la competencia (—); I_s : importancia relativa de las restricciones (—); I_a : importancia relativa de la alteración (-.-.).

4.2.11 Ordenación Triangular

Este método consiste en una ordenación triangular en la que las especies se clasifican de acuerdo con dos criterios: En el primero se estima la productividad en g ($R_{\text{máx}}$), se calcula de acuerdo a la productividad en dos tiempos: en la época de crecimiento de marzo y septiembre ($T_1 - T_2$). En el segundo criterio se calcula el índice mórfico (M) con la fórmula $M = (a+b+c)/2$ donde a es la máxima altura estimada del follaje (1 < 12 cm; 2: 12-25 cm; 3: 25-37 cm; 4: 37-50 cm; 5: 50-62 cm; 6: 62-75 cm; 7: 75-87 cm; 8: 87-100cm; 9:100-112 cm y 10

>112 cm); **b** es la expansión lateral (0: pequeñas terófitas; 1: terófitas robustas; 2: perennes con un rizoma compacto sin ramificar o formando pequeños macollos de 10 cm de diámetro; 3: perennes con rizoma o macollo que llega a tener un diámetro 10-25 cm; 4: perennes que alcanzan un diámetro de 26-100 cm, 5: perennes que alcanzan un diámetro >100 cm) y **c** es la acumulación máxima estimada de hojarasca persistente (0: ninguna; 1: cubierta delgada discontinua; 2: cubierta delgada continua; 3: hasta un cm de profundidad; 4: hasta 5 cm de profundidad; 5: más de 5 cm de profundidad) (Grime, 1982).

5. RESULTADOS

El número total de sitios de muestreo en el jale de la mina de La Paz fue de cinco. El criterio de selección fue la exposición: se eligió un sitio por cada punto cardinal y un sitio en la parte superior o zenital del jale. Cada sitio midió 64m² y dentro de cada uno se colocaron al azar cuatro parcelas (sub-unidades de muestreo) de 16 m² cada una (Cuadro 2).

Cuadro 2. Sitios de muestreo en el jale de La Paz

Sitio	Exposición
1	Este
2	Sur
3	Oeste
4	Zenital
5	Norte.

El número total de especies colectadas fue de 34 y la densidad total fue de 1924 individuos (Cuadro 4). El número total de especies fue alto si se considera el tipo de sustrato. Sánchez (1998) y Sánchez y Granados (2003) mencionan que la riqueza de especies en las comunidades vegetales de la Sierra de Catorce varía a lo largo del gradiente altitudinal y describen los factores que tienen mayor relación con esta variación. En el área de estudio se encontraron 15 familias, la más representativa fue Asteraceae (Cuadro 3).

Cuadro 3. Familias, especies y formas de vida presentes en el área de estudio.

Familia	Especies	F.V.
Asteraceae	<i>Gutierrezia microcephala</i> (DC.) A. Gray.	Ch
	<i>Zaluzania triloba</i> (Ortega) Pers.	Ch
	<i>Baccharis conferta</i> Kunth.	Ch
	<i>Bidens odorata</i> Cav.	T
	<i>Parthenium hysteriophorus</i> L.	G
	<i>Brickellia veronicifolia</i> (Kunth) A. Gray.	Ch
	<i>Thymophylla acerosa</i> (DC) Srother	Ch
	<i>Haplopappus tenacetifolia</i> (HBK) Ness. Det. M.L.S.	Ch
	<i>Stevia salicifolia</i> Cav.	Ch
	<i>Dyssodia acerosa</i> DC.	Ch
	<i>Dyssodia papposa</i> (Vent.) Hiltchc.	Ch
	<i>Dyssodia setifolia</i> (Lag.) B.L. Rob.	Ch
	<i>Solidago scabrida</i> DC.	Ch
	<i>Sonchus oleraceus</i> Cav.	H
Solanaceae	<i>Solanum nigrescens</i> M. Martens & Galeotti.	H
	<i>Solanum elaeagnifolium</i> Cav.	H
	<i>Nicotiana glauca</i> Graham.	Ph
Poaceae	<i>Bromus unioloides</i> Kunth	H
	<i>Stipa tenuissima</i> Trin.	H
	<i>Bouteloua curtipendula</i> (Michx.) Torr.	H
Lamiaceae	<i>Marrubium vulgare</i> L.	Ch
	<i>Salvia</i> L.	T
Papaveraceae	<i>Argemone mexicana</i> L.	T
	<i>Escholtzia californica</i> Cham.	H
Onagraceae	<i>Gaura coccínea</i> Pursh	T
Cucurbitaceae	<i>Cucurbita foetidissima</i> Kunth	G
Anacardiaceae	<i>Schinus molle</i> L.	Mf
Ephedraceae	<i>Ephedra compacta</i> Rose	Ch
Euphorbiaceae	<i>Euhorbia furcillata</i> Kunth.	H
Chenopodiaceae	<i>Salsola kali</i> L.	Ch
Resedaceae	<i>Reseda luteola</i> L.	H
Cactaceae	<i>Opuntia pumila</i> Rose.	Ae
Liliaceae	<i>Asphodelus fistulosus</i> L.	G
Brassicaceae	<i>Leavenworthia aurea</i> Torr.	H

F.V. = Forma de vida de Raunkiaer

Ch= Caméfitas

H=Hemicriptófitas

G=Geófitas

T=Terófitas

Ph= Nanofanerófitas

Mf= Microfanérofítas

Ae=Articuladas-Expandidas

Cuadro 4. Listado de especies y su densidad total

Especie	Número de individuos/164 m ²
<i>Gutierrezia microcephala</i> (DC) A. Gray.	205
<i>Zaluzania triloba</i> (Ortega) Pers.	102
<i>Asphodelus fistulosus</i> L.	748
<i>Solanum nigrescens</i> M. Martens & Galeotti.	75
<i>Cucurbita foetidissima</i> Kunth.	4
<i>Baccharis conferta</i> Kunth.	22
<i>Solanum elaeagnifolium</i> Cav.	63
<i>Parthenium hysteriophorus</i> L.	55
<i>Bidens odorata</i> Cav.	107
<i>Nicotiana glauca</i> Graham.	49
<i>Marrubium vulgare</i> L.	1
<i>Sonchus oleraceus</i> L.	8
<i>Brickellia veronicifolia</i> (Kunth) A. Gray.	6
<i>Thymophylla acerosa</i> (DC) Srother	1
<i>Haplopappus tenacetifolia</i> (HBK) Ness Det. MLS.	25
<i>Gaura coccinea</i> Pursh.	17
<i>Bouteloua curtipendula</i> (Michx.) Torr.	3
<i>Salvia</i> L.	25
<i>Schinus molle</i> L.	2
<i>Ephedra compacta</i> Rose.	241
<i>Euphorbia furcillata</i> Kunth	3
<i>Bromus unioloides</i> Kunth.	1
<i>Stipa</i> □ <i>tenuísima</i> Trin.	6
<i>Stevia salicifolia</i> Cav.	1
<i>Escholtzia californica</i> Cham.	26
<i>Salsola kali</i> L.	53
<i>Reseda luteola</i> L.	4
<i>Leavenworthia aurea</i> Torr.	48
<i>Opuntia pumila</i> Rose	1
<i>Dyssodia papposa</i> (Vent.) Hitchc.	2
<i>Dyssodia acerosa</i> DC.	3
<i>Solidago scabrida</i> DC.	5
<i>Dyssodia setifolia</i> (Lag) BL. Rob.	4
<i>Argenome mexicana</i> L.	8

Cuadro 5. Densidad de individuos por especie en el sitio 1

Especie	Densidad
<i>Gutierrezia microcephala</i> (DC.) A. Gray	74
<i>Zaluzania triloba</i> (Ortega) Pers.	79
<i>Asphodelus fistulosus</i> L.	576
<i>Solanum nigrescens</i> M. Martens & Galeotti.	74
<i>Cucurbita foetidissima</i> Kunth.	1
<i>Baccharis conferta</i> Kunth.	11
<i>Solanum elaeagnifolium</i> Cav.	21
<i>Parthenium hysteriophorus</i> L.	15
<i>Bidens odorata</i> Cav.	107
<i>Nicotiana glauca</i> Graham.	33
<i>Marrubium vulgare</i> L.	1
<i>Sonchus oleraceus</i> L.	8
<i>Brickellia veronicifolia</i> (Kunth) A. Gray.	3

El sitio 1 fue el de exposición este y se localiza en las coordenadas geográficas 23° 41' 50.2" N y 100° 51' 08.3" W; la altitud fue de 2 550 m. Se registraron en total 13 especies y 1 003 individuos (Cuadro 5).

El sitio 2 fue el de exposición sur, las coordenadas geográficas son 23° 41' 53.7" N y 100° 50' 57.7" W y la altitud fue de 2 541 m. Se colectaron 17 especies y se contabilizaron en total 448 individuos (Cuadro 6).

Cuadro 6. Densidad de individuos por especie en el sitio 2

Especie	Densidad
<i>Gutierrezia microcephala</i> (DC.) A. Gray.	89
<i>Zaluzania triloba</i> (Ortega) Pers.	23
<i>Asphodelus fistulosus</i> L.	31
<i>Cucurbita foetidissima</i> Kunth.	1
<i>Baccharis conferta</i> Kunth.	8
<i>Solanum elaeagnifolium</i> Cav.	1
<i>Thymophylla acerosa</i> (DC) Srother	1
<i>Haplopappus tenacetifolia</i> (HBK) Ness Det. M.L.S.	16
<i>Gaura coccinea</i> Pursh.	17
<i>Bouteloua curtipendula</i> (Michx.) Torr.	3
<i>Salvia</i> L.	5
<i>Schinus molle</i> L.	1
<i>Ephedra compacta</i> Rose.	241
<i>Euphorbia furcellata</i> Kunth.	3
<i>Bromus unioloides</i> Kunth.	1
<i>Stipa tenuísima</i> Trin.	6
<i>Stevia salicifolia</i> Cav.	1

El sitio 3 fue el de exposición oeste en el jale, las coordenadas geográficas son 23° 41' 45.9" N y 100° 50' 50.6" W, la altitud fue de 2 539 m. En este sitio se contabilizaron 173 individuos pertenecientes a 9 especies (Cuadro 7).

Como sitio 4 se eligió el de exposición zenital, en la parte superior del jale. Se localiza en las coordenadas geográficas 23° 41' 47.8" N y 100° 50' 56.9" W, la altitud fue de 2 554 m. En este sitio se contabilizaron en total 159 individuos de 16 especies (Cuadro 8).

Cuadro 7. Densidad de individuos por especie en el sitio 3

Especie	Densidad
<i>Asphodelus fistulosus</i> L.	4
<i>Solanum elaeagnifolium</i> Cav.	6
<i>Parthenium hysterophorus</i> L.	40
<i>Brickellia veronicifolia</i> (Kunth) A. Gray.	1
<i>Salvia</i> L.	16
<i>Escholtzia californica</i> Cham.	13
<i>Salsola kali</i> L.	40
<i>Reseda luteola</i> L.	4
<i>Leavenworthia aurea</i> Torr.	48
<i>Opuntia pumila</i> Rose	1

El sitio 5 fue el de exposición norte, se localiza en las coordenadas geográficas 23° 41' 47.5" N y 100° 51' 10.1" W y la altitud fue de 2 556 m. Se contaron en total 141 individuos pertenecientes a 11 especies (Cuadro 9).

Cuadro 8. Densidad de individuos por especie en el sitio 4

Especie	Densidad
<i>Gutierrezia microcephala</i> (DC.) A. Gray.	30
<i>Asphodelus fistulosus</i> L.	74
<i>Cucurbita foetidissima</i> Kunth.	2
<i>Baccharis conferta</i> Kunth.	3
<i>Solanum elaeagnifolium</i> Cav.	2
<i>Nicotiana glauca</i> Graham.	1
<i>Haplopappus tenacetifolia</i> (HBK) Ness Det. M.L.S.	9
<i>Salvia</i> L.	3
<i>Schinus molle</i> L.	1
<i>Escholtzia californica</i> Cham.	7
<i>Salsola kali</i> L.	7
<i>Dyssodia papposa</i> (Vent.) Hitchc.	1
<i>Dyssodia acerosa</i> DC.	3
<i>Solidago scabrida</i> DC.	5
<i>Dyssodia setifolia</i> (Lag) BL. Rob.	4
<i>Argenome mexicana</i> L.	7

Cuadro 9. Densidad de individuos por especie en el sitio 5

Especie	Densidad
<i>Gutierrezia microcephala</i> (DC) A. Gray.	12
<i>Asphodelus fistulosus</i> L.	63
<i>Solanum nigrescens</i> M. Martens. & Galeotti	1
<i>Solanum elaeagnifolium</i> Cav.	33
<i>Nicotiana glauca</i> Graham.	15
<i>Brickellia veronicifolia</i> (Kunth) A. Gray	2
<i>Salvia</i> L.	1
<i>Escholtzia californica</i> Cham.	6
<i>Salsola kali</i> L.	6
<i>Dyssodia papposa</i> (Vent.) Hitchc.	1
<i>Argenome mexicana</i> L.	1

5.1 Índices de diversidad

El sitio con más alta diversidad, de acuerdo al índice de Shannon-Weiner, fue el sitio 4, con 1.87 (Cuadro 10). En la estimación de este índice se toma en cuenta tanto el número de especies como la equidad o uniformidad de la distribución del número de individuos en cada especie. Un mayor número de especies y una uniformidad alta incrementan la diversidad (Franco, 1985; Magurran, 1988). En contraste, con el índice de Simpson el sitio 3 fue el de mayor diversidad (5.10); este índice concede poca importancia a las especies escasas y es sensible a las especies abundantes (Magurran, 1988), lo cual afecta su valor. De cualquier forma, el sitio 4 fue el segundo en importancia en cuanto a diversidad de especies (Cuadro 10).

Cuadro 10. Índices de diversidad para cada sitio de muestreo

Sitio	Shannon-Weiner	Simpson
1	1.51	2.78
2	1.56	2.95
3	1.79	5.10
4	1.87*	3.85
5	1.61	3.67

5.2 Análisis de semejanza

El dendrograma de la Figura 3 muestra que los sitios de muestreo 4 y 5 son los de mayor semejanza, el sitio 3 es el más cercano en composición de especies a ambos sitios y después el sitio 1. El sitio 2 es el que presenta la mayor diferencia en composición de especies con respecto a los demás sitios (Figura 3).

La alta semejanza entre los sitios 4 y 5 se debe a que en ambos sitios se encuentran presentes las siguientes especies: *Gutierrezia microcephala*, *Asphodelus fistulosus*, *Solanum elaeagnifolium*, *Nicotiana glauca*, *Salvia*, *Escholtzia californica*, *Salsola kali*, *Dyssodia papposa* y *Argemone mexicana*. El sitio 3 se une con los sitios 4 y 5 para conformar un grupo que comparte las siguientes especies: *Asphodelus fistulosus*, *Solanum elaeagnifolium*, *Salvia*, *Escholtzia californica* y *Salsola kali*.

De acuerdo con el nivel de corte elegido el sitio 1 no forma parte de ningún grupo y sólo comparte dos especies con el grupo formado por los sitios 4, 5 y 3: *Asphodelus fistulosus* y *Solanum elaeagnifolium*. El sitio 2 también es independiente y es el de menor semejanza con todos los demás sitios, sólo comparte dos especies con los sitios 4, 5, 3 y 1: *Asphodelus fistulosus* y *Solanum elaeagnifolium*.

Las especies que aparecieron en todos sitios de muestreo fueron: *Asphodelus fistulosus* y *Solanum elaeagnifolium*. *Salvia*, se presentó en 4 de los sitios,

Escholtzia californica, *Salsola kali*, *Cucurbita foetidissima*, *Baccharis conferta*, *Brickellia veronicifolia* y *Nicotiana glauca* en tres sitios; *Dyssodia papposa*, *Argemone mexicana*, *Haplopappus tenacetifolia*, *Parthenium hysterophorus*, *Solanum nigrescens* y *Zaluzania triloba* en dos sitios y las especies restantes sólo aparecieron en un sitio.

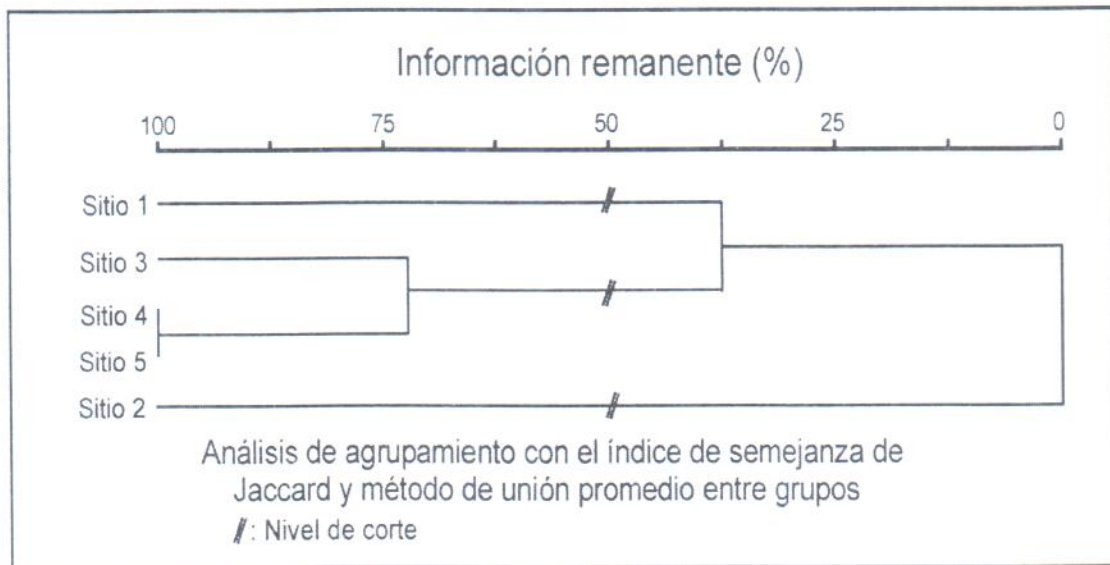


Figura 3. Dendrograma donde se muestran los sitios con mayor semejanza.

5.3 Ordenación directa

El valor de las raíces características para los tres primeros ejes de la ordenación muestra que hay una separación significativa entre las comunidades vegetales a lo largo de los tres primeros ejes de variación, asociada a gradientes ambientales (Cuadro 11). Los resultados de la prueba de permutaciones de Monte Carlo indican que tanto los valores de las raíces características para los tres primeros ejes como los valores de correlación entre

las especies, las variables ambientales y los tres primeros ejes de la ordenación, son significativos ($P < 0.05$). El diagrama de ordenación proporcionó una representación adecuada de la distribución de las comunidades vegetales (o de las especies) y de las variables ambientales relacionadas (Figura 4).

Cuadro 11. Resultados del análisis de correspondencia canónica, valores de las raíces características, correlación entre las especies y los factores ambientales y el porcentaje de varianza, para los tres primeros ejes de la ordenación

Ejes	1	2	3
Raíces características	0.56	0.39	0.38
Correlación especies-factores ambientales	1.0	1.0	1.0
Varianza acumulada (%)	38.1	64.2	89.8
Inercia total: 1.48			

En el Cuadro 12 se muestran los valores de correlación entre las variables ambientales y los tres primeros ejes de la ordenación. Las variables ambientales con mayor correlación con el Eje 1 fueron: Magnesio (Mg): -0.63; Potasio (K): 0.54; y Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC): -0.56. La variables con mayor correlación con el Eje dos fueron: Materia orgánica (MO): 0.91; Fósforo (P): 0.89 y el Potencial hidrógeno (pH): 0.683. La Arcilla fue una de las variables con mayor correlación con el Eje 3 (0.87) junto con el Sodio (Na): 0.81 y el Potasio (K): 0.80.

Aun cuando en el análisis no se incluyó a la exposición, se pudo constatar tanto en el trabajo de campo como en la posición de los sitios en el diagrama de

ordenación, que esta juega un papel muy importante en la distribución de las especies (Figura 4). La pendiente es otra variable importante, los sitios con pendiente moderada presentaron mayor diversidad de especies pues en estas condiciones se favorece la formación de micro-sitios de germinación y desarrollo de las especies.

Cuadro 12. Correlación entre los tres ejes de la ordenación y las trece variables ambientales

Variable	Eje		
	1	2	3
H	-0.17	-0.68	-0.44
MO	-0.14	0.91	-0.33
P	-0.27	0.89	-0.29
K	0.54	0.24	-0.80
Na	-0.33	-0.48	-0.81
Ca	0.26	-0.17	-0.61
Mg	-0.63	-0.33	-0.67
ClC	-0.56	-0.56	-0.58
Da	0.40	-0.58	-0.10
Dr	-0.20	0.35	0.83
Arena	0.43	0.56	0.69
Limo	-0.50	-0.59	-0.62
Arcilla	0.23	-0.16	-0.87

En la Figura 4 se observa el diagrama de ordenación de los sitios, las especies y los factores ambientales obtenido mediante el Análisis de Correspondencia Canónica (CCA). Como se explicó antes (Cuadro 11), algunas variables ambientales tienen alta correlación con la distribución de las especies (Cuadro 12). El diagrama de ordenación confirma también los resultados del análisis de agrupamiento sobre la semejanza entre sitios (Figura 3): obsérvese que los

sitios 4 y 5, que tienen el mayor número de especies en común aparecen más cercanos entre si en el centro del diagrama. Las variables ambientales de pH, K, Mg, Arena, en el análisis de correspondencia (Anexo 1) en algunos ejes no resultaron ser significativos, pero al combinarse con otros factores ambientales tienen alta correlación es por ello que el análisis tomo estas cuatro variables como las más significativas, las cuales restringen en cierto modo la distribución de las especies en la zona de estudio.

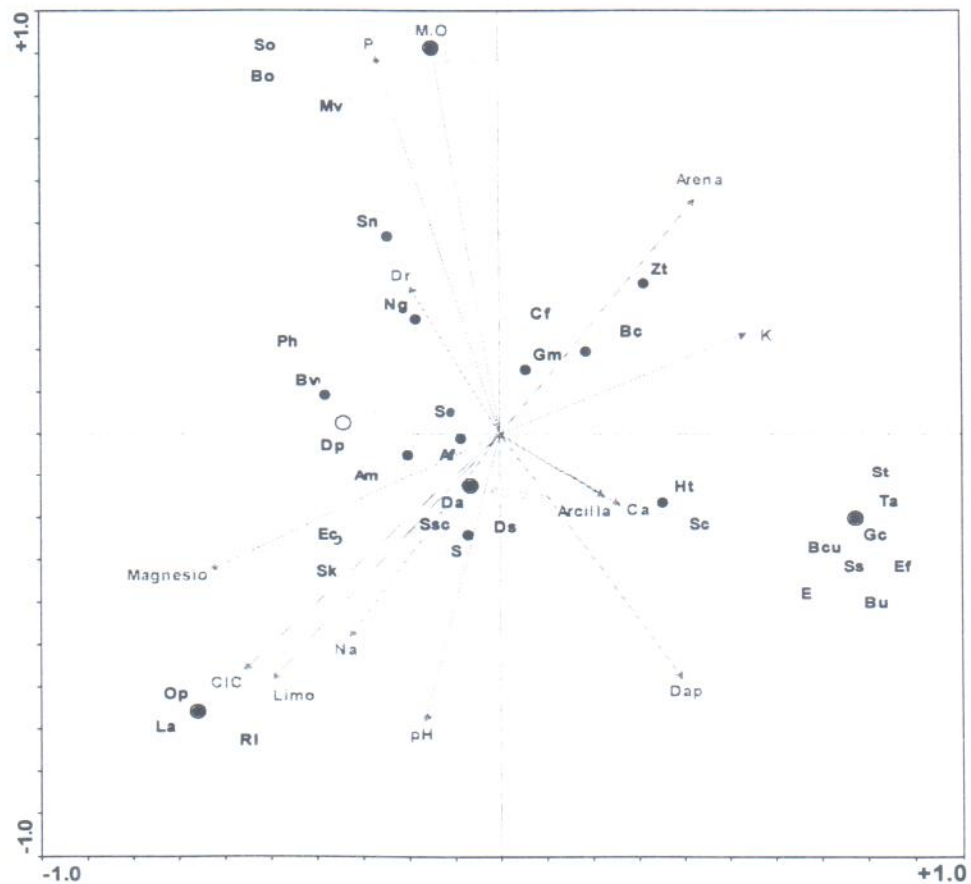


Figura 4. Análisis de correspondencia canónica de 5 sitios de muestreo con 34 especies de plantas y 13 variables ambientales.

5.4 Formas de vida

De las 34 especies clasificadas diez fueron Hemicriptófitas (H), tres Geófitas (G), cuatro Terófitas (T), catorce Caméfitas (Ch) y sólo hubo una especie para cada una de las siguientes formas de vida: Nanofanerófitas (Ph), Microfanérofitas (Mf) y Articuladas-Expandidas (Ae).

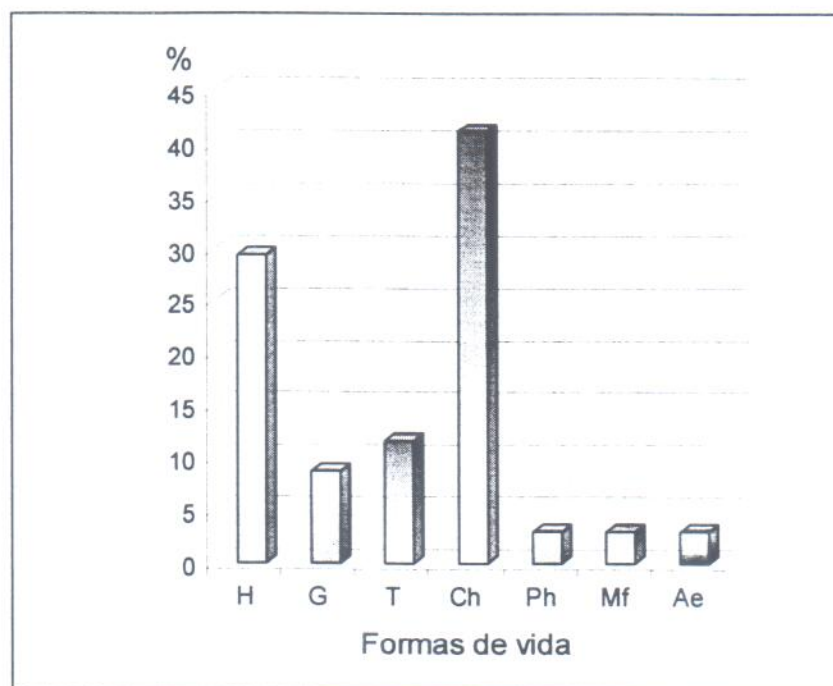


Figura 5. Representación gráfica de los espectros biológicos en porcentaje.

H= Hemicriptófitas, G= Geófitas, T= Terófitas, Ch= Caméfitas, Ph= Nanofanerófitas, Mf= Microfanérofitas, Ae= Articulada-Expandida.

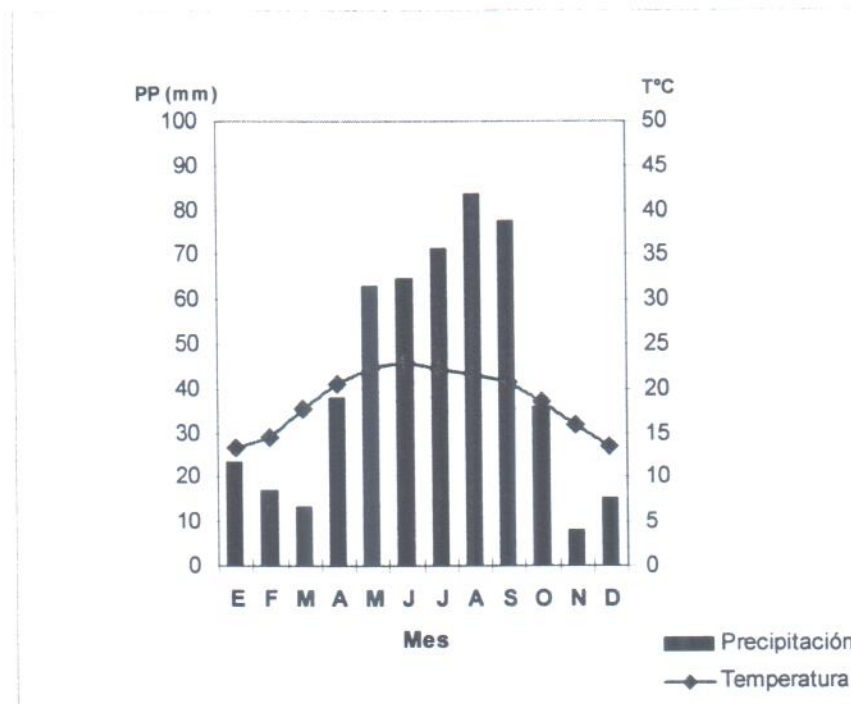


Figura 6. Climograma de la Estación Matehuala (23°40' N, 100°39' W).

La forma de vida más abundante fue de Caméfitas (41%), en segundo lugar la de Hemicriptófitas (29%) y en tercer lugar la de las Terófitas (12 %) (Figura 5). Es probable que este espectro biológico se relacione con las condiciones ambientales limitantes: las temperaturas que se registran en la zona de estudio son altas, la precipitación es baja y el tipo de suelo es muy fino y no permite la infiltración del agua. En los meses de mayo a octubre se da el período de lluvias (Figura 5). Un factor ambiental muy importante que influye sobre las formas de vida es la disponibilidad de agua.

5.5 Evaluación de las estrategias de colonización

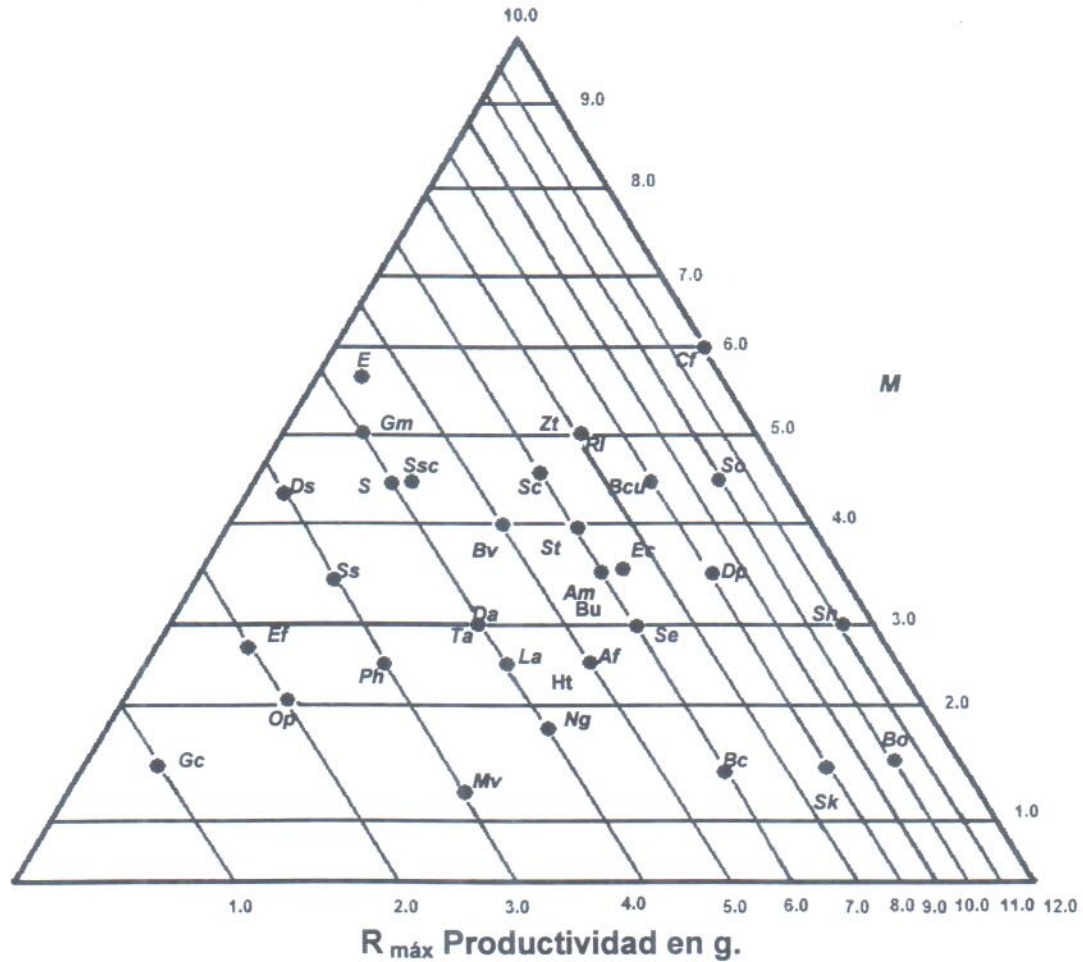


Figura 7. Ordenación triangular de las especies herbáceas, anuales y perennes, encontradas en el área de estudio.

Clave para las especies: **Zt**; *Zaluzania Triloba*, **Gm**; *Gutierrezia microcephala*, **Bc**; *Baccharis conferta*, **Bo**; *Bidens odorata*, **So**; *Sonchus oleraceus*, **Bv**; *Brickellia veronicifolia*, **Ht**; *Haplopappus tenacetifolia*, **Ss**; *Stevia salicifolia*, **La**; *Leavenworthia aurea*, **Ds**; *Dyssodia setifolia*, **Da**; *Dyssodia acerosa*, **Dp**; *Dyssodia papposa*, **Ssc**; *Solidago scabrada*, **Bu**; *Bromus unioides*, **Bcu**; *Bouteloua curtipendula*, **St**; *Stipa tenuissima*, **S**; *Salvia L.*, **Ef**; *Euphorbia furcellata*, **E**; *Ephedra compacta*, **Cf**; *Cucurbita foetidissima*, **Sk**; *Salsola kali*, **Mv**; *Marrubium vulgare*, **Se**; *Solanum elaeagnifolium*, **Sn**; *Solanum nigrescens*, **Ng**; *Nicotiana glauca*, **Af**; *Asphodelus fistulosus*, **Rl**; *Reseda luteola*, **Gc**; *Gaura coccinea*, **Ec**; *Escholtzia californica*, **Am**; *Argemone mexicana*, **Op**; *Opuntia pumila*, **Sc**; *Schinus molle*, **Ph**; *Parthenium hysteriophorus*, **Ta**; *Thymophylla acerosa*.

En esta ordenación, podemos ver que la mayoría de la especies presentan un Índice mórfico de entre 1 y 5 y un $R_{\text{máx}}$ de productividad de 3 a 10 g (Figura 7). De acuerdo al modelo que describe los diversos equilibrios entre la competencia, las restricciones, la alteración de la vegetación y la localización de las estrategias primarias y secundarias (Grime, 1982), la mayoría de las especies vegetales establecidas se encuentra en la zona de las estrategias C-S-R, C-R y C-S. La primer estrategia corresponde a las plantas confinadas a hábitat en los que la competencia esta restringida por intensidades moderas de la combinación entre estrés y disturbio. La segunda estrategia es la de ruderales competidoras: plantas adaptadas a circunstancias en donde hay bajo impacto del estrés y la competencia esta restringida por una intensidad moderada de disturbio. La tercera estrategia corresponde a las plantas tolerantes al estrés, que son plantas adaptadas a condiciones sin disturbio, que experimentan intensidades moderadas de estrés. La mayoría de las especies de la zona estudiada fueron ruderales y algunas de ellas (3 especies) mostraron sólo esta estrategia. Las especies restrictivas fueron *Gaura coccinea* y *Opuntia pumila*.

Todas las especies presentaron diversas estrategias de adaptación, tales como el sistema radicular, la fenología, la producción de semillas y los órganos de almacenamiento (Figura 8).



Figura 8. Diversos tipos de raíz de las especies analizadas.

La (figura 9) esquematiza la distribución de las especies de acuerdo a su coeficiente mórfico y a la producción de R máx. de las plantas colectadas se puede observar, que la distribución predominante fue la concentrada (La especie asume solo una estrategia por lo tanto, en el triángulo se manifiestan los núcleos muy concéntricos y puntuales en una sola área) con 18 especies representando un total del 52% y la forma variable (La especie muestra mucha plasticidad, para asumir en el campo diversas estrategias de colonización) conformada por 16 especies, con el 47%.

5.5.1 Diagramas que representan la distribución de las especies de acuerdo a sus estrategias de colonización.

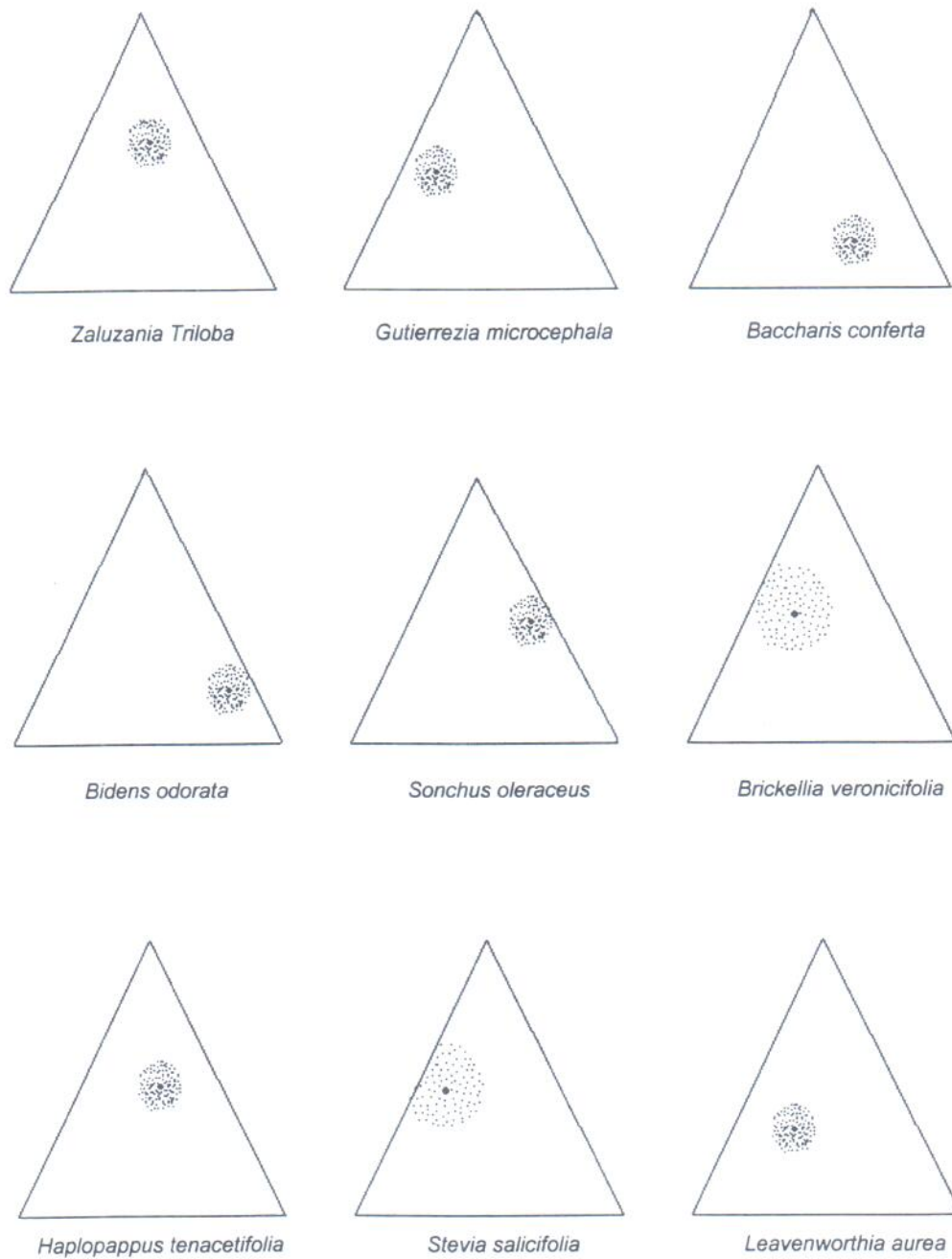
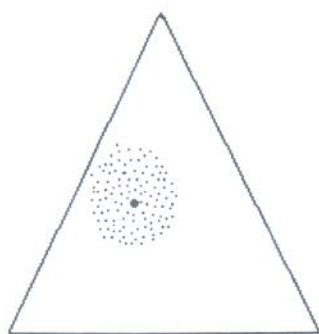


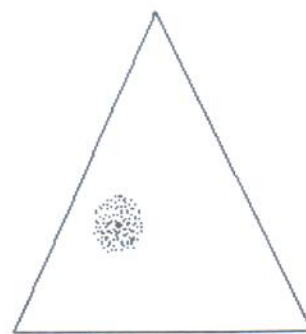
Figura 9. Diagramas de la distribución de las especies de acuerdo a su coeficiente y a la producción de R máx.



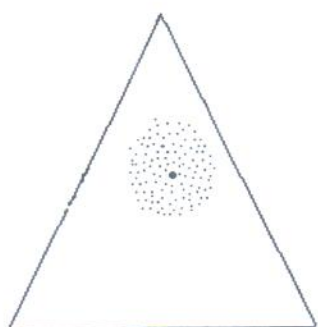
Dyssodia setifolia



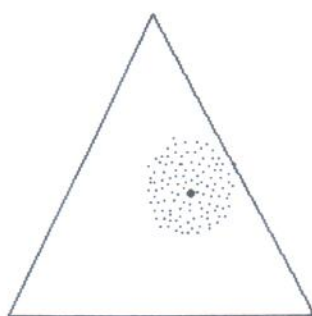
Dyssodia acerosa



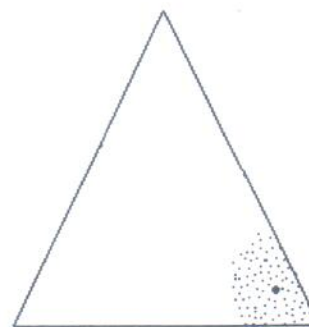
Dyssodia papposa



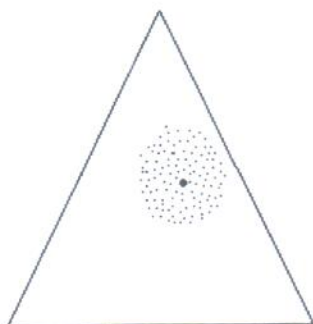
Solidago scabrida



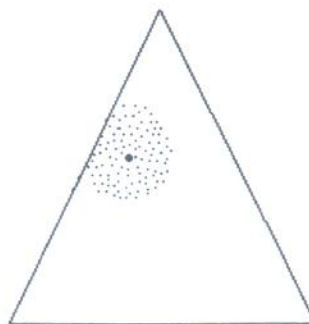
Bromus unioloides



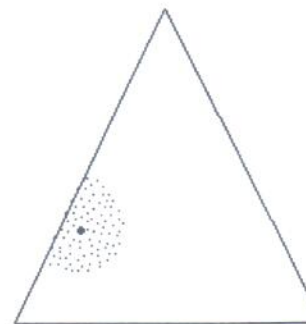
Bouteloua curtipendula



Stipa tenuissima

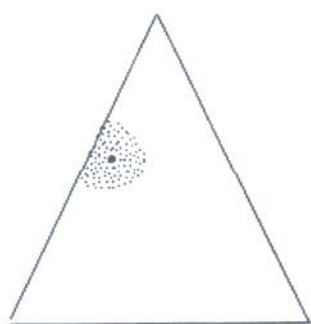


Salvia L.

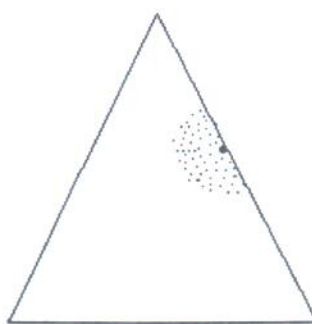


Euphorbia furcellata

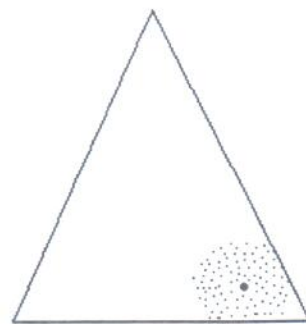
Figura 9. Continuación.



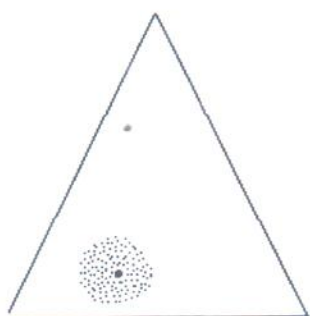
Ephedra compacta



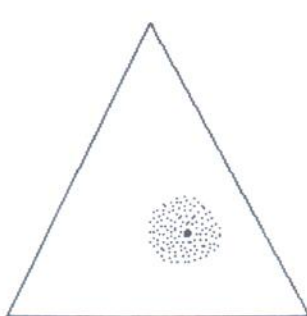
*Cucurbita
foetidissima*



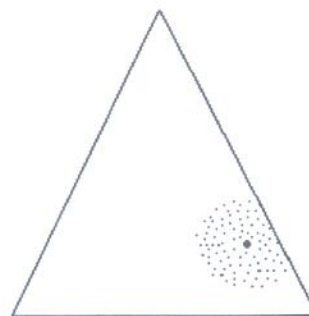
Salsola kali



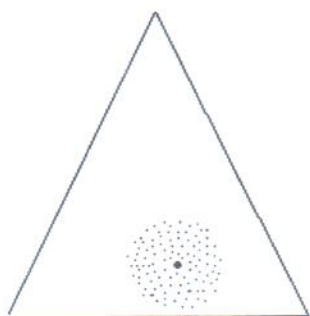
Marrubium vulgare



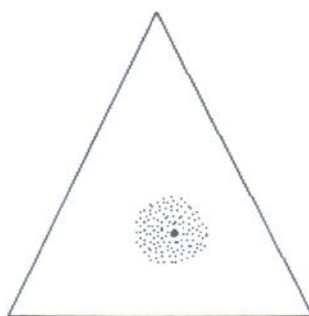
*Solanum
elaegnifolium*



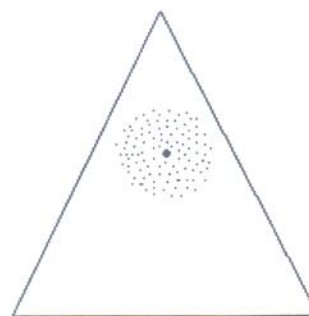
Solanum nigrescens



Nicotiana glauca



Asphodelus fistulosus



Reseda luteola

Figura 9. Continuación.

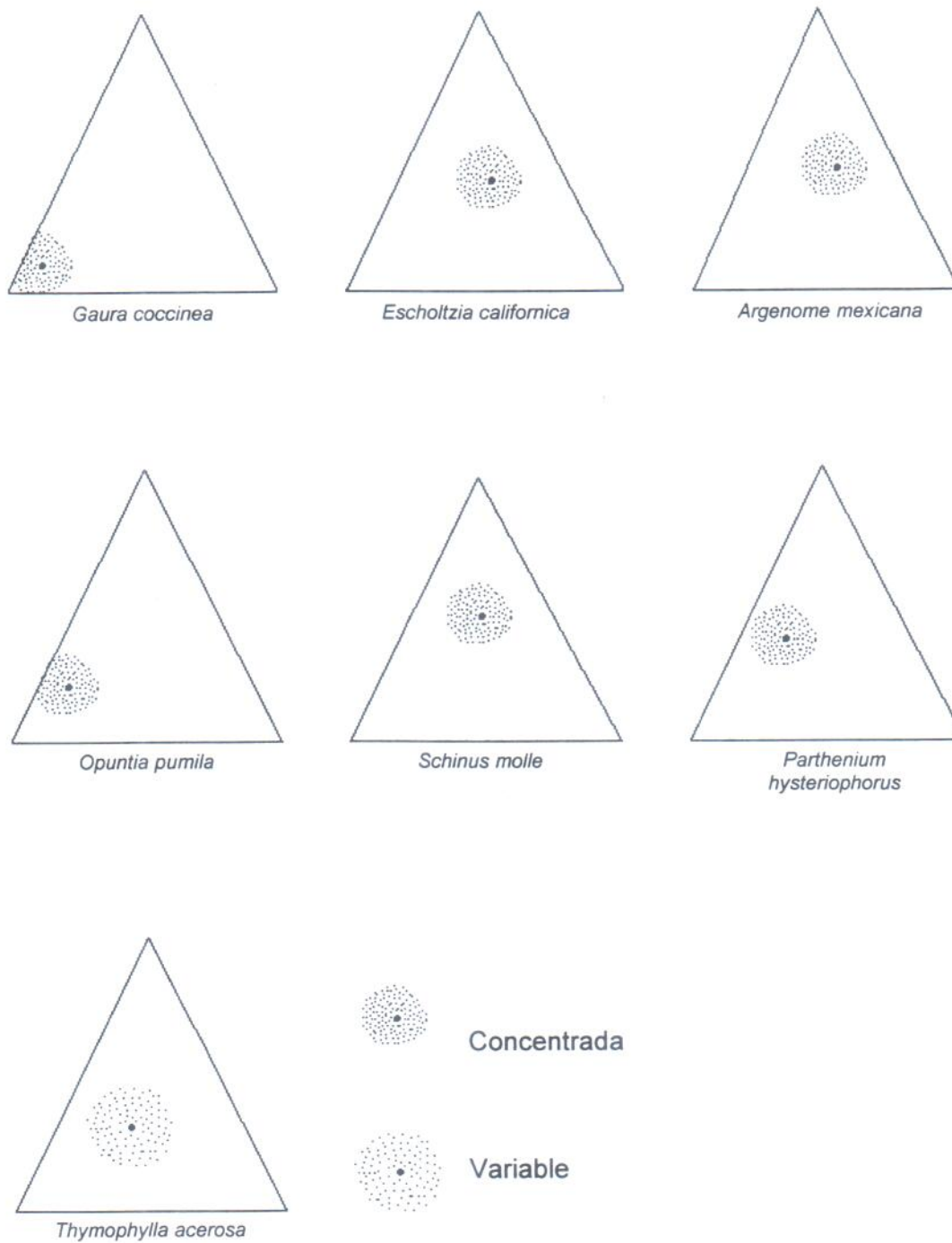


Figura 9. Continuación.

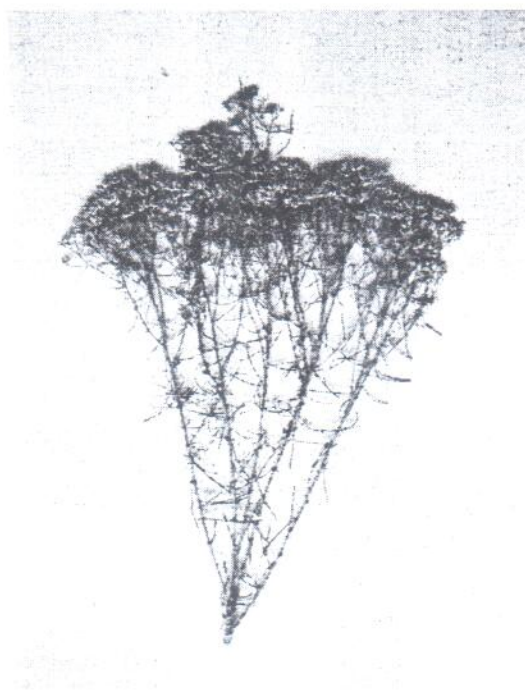
5.6 Descripción botánica de las especies



***Zaluzania Triloba* (Ortega) Pers.**

Planta herbácea perenne, hasta 1 m de alto, erecta; tallos ramificados, estriados, hispídos a hirsutos o pubérulos; hojas pecioladas; cabezuelas agrupadas hacia los extremos de las ramas sobre pedúnculos hasta de 6 cm de largo; aquenios negruzcos o cafés oscuros, de 2mm aproximadamente. Hábitat: bosques secos y abiertos, matorrales.

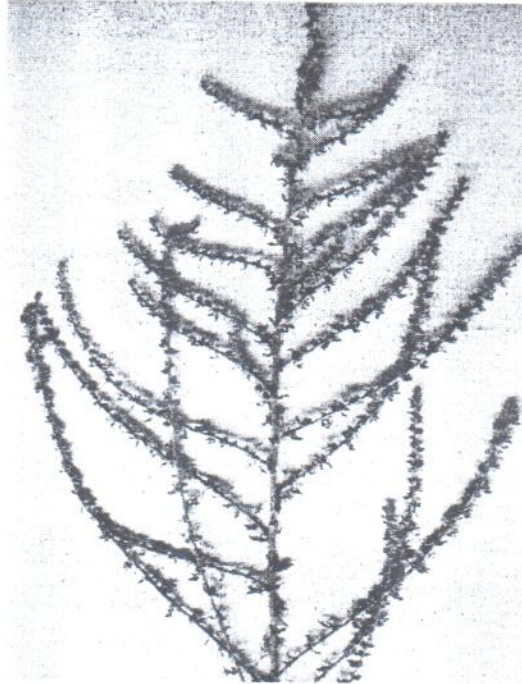
En los jales de minas analizados la especie crece en sitios con pH que varía de 7.65 a 8.11; en suelos de textura franco-arenosa y con porcentaje de materia orgánica entre 0 y 0.13 (Anexo 1). De acuerdo a la ordenación triangular es una especie con estrategia C-S-R, por su coeficiente mórfico y por la producción de R máx. Su distribución fue concentrada.



***Gutierrezia microcephala* (DC.) A. Gray.**

Planta herbácea subarborescente a menudo glutinoso-resinosa; hojas alternas; cabezuelas solitarias a calimbosas; flores liguladas, hermafroditas, corola amarilla; aquenios turbinados a cilíndricos u oblongos y algo comprimidos, planta ruderal.

En el área de estudio crece sobre sitios con pH entre 7.65 y 8.29; en suelos de textura franco-arenosa; el porcentaje de materia orgánica varía entre 0-0.13. De acuerdo a la ordenación triangular es una especie con estrategia C-S. Su distribución fue concentrada.



Baccharis conferta Kunth.

Arbusto glutinoso de 1-2 m de altura, ramoso; hojas cuneadas o romboideas, usualmente 3-5 dentadas, rara vez enteras, con una nervadura media prominente. Cabezuelas subsésiles, aglomeradas en el extremo de las ramas; flores blancas; aquenios glabros, con el vilano plumoso. Abunda en los claros de los bosques y terrenos deforestados.

En la Sierra de Catorce crece en sitios con pH entre 7.65-8.11, en suelos de textura franco-arenosa, con porcentaje de materia orgánica de 0 a 0.13. La ordenación triangular muestra que es una especie con estrategia R. Su distribución fue concentrada.



***Bidens odorata* Cav.**

Cabezuelas heterógamas, radiadas, rara vez discoideas, solitarias, en corimbos o panojas. Flores marginales amarillas o blancas, liguladas, neutras; flores del disco siempre amarillas hermafroditas; ramas del estilo truncada; aquenios dorsalmente comprimidos; vilano de 2-4 aristas rígidas; hierbas anuales o perennes, con las hojas opuestas, enteras, dentadas o partidas; raíz pivotante; fruto aquenio.

La especie crece en sitios con pH de 7.65; en suelos de textura franco-arenosa, con porcentaje de materia orgánica de 0.13. La ordenación triangular muestra que es una especie con estrategia R. Su distribución fue concentrada.



***Sonchus oleraceus* Cav.**

Hierba anual, erguida, glabra, de 50-80 cm de altura; hojas basales runcinadas, con los lóbulos dentados, hojas superiores agudas, sésiles, auriculadas, dentadas; cabezuelas cimoso-paniculadas en el extremo de los tallos; flores numerosas, amarillas; aquenios alargados, comprimidos, con varias costillas; vilano de pelos blancos, blandos; maleza.

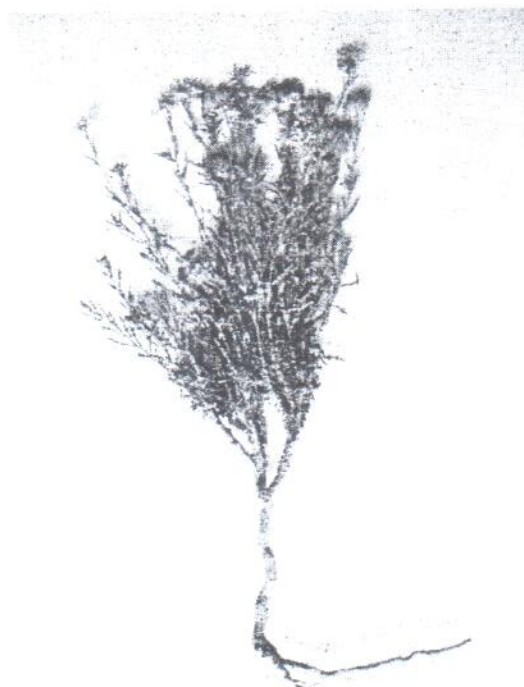
En el área de estudio la especie habita en sitios con pH de 7.65, en suelos de textura franco-arenosa; con porcentaje de materia orgánica de 0.13; la ordenación triangular muestra que es una especie con estrategia C-R. Su distribución fue concentrada.



***Brickellia veronicifolia* (Kunth) A. Gray**

Planta erecta, de un metro de altura, con las ramas purpúreas, oscuras y tomentosas. Hojas pequeñas, reniformes, pecíolos tomentosos en ambas caras. Cabezuelas axilares, solitarias o en grupos escasos en el extremo de las ramas; brácteas involúcrales verdes, con el extremo purpúreo; flores rosadas, florece en octubre y noviembre.

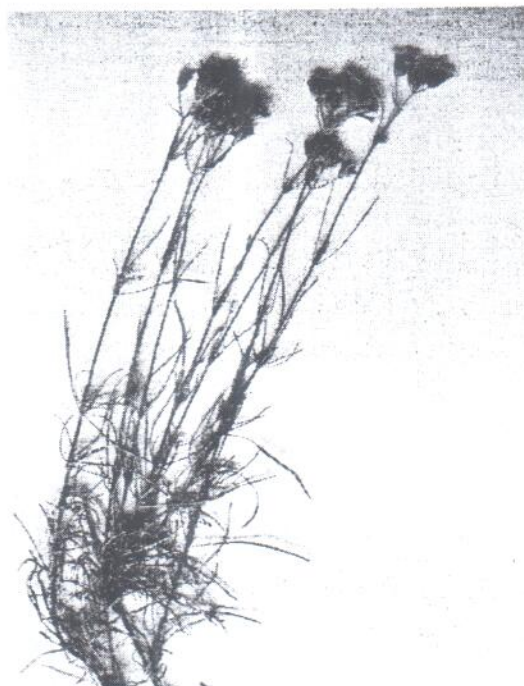
Esta especie habita sitios con un pH de 7.65 a 8.29-8.46, en suelos de textura franco-arenosa y franco-limosa. El porcentaje de materia orgánica varía de 0.0 a 0.13. La ordenación triangular muestra que es una especie con estrategia C-S-R. Su distribución fue variable.



***Haplopappus tenacetifolia* (HBK) Ness. Det. M.L.S.**

Cabezuelas solitarias, pedunculadas, terminales heterógamas. Flores periféricas uniseriadas, femeninas, liguladas, de color amarillo; aquenios comprimidos, obtusos, peludos; vilano de múltiples pelos desiguales. Hierbas perennes con las hojas alternas, enteras, aserradas.

Esta especie se desarrolla en sitios con pH de entre 7.65 y 8.29, en suelos de textura franco-arenosa; el porcentaje de materia orgánica varía de 0.0 a 0.13. De acuerdo con la ordenación triangular es una especie con estrategia C-S-R; por su coeficiente mórfico y por la producción de R máx. Su distribución fue concentrada.



***Stevia salicifolia* Cav.**

Planta arbustiva, erguida, de 25 cm a 1 m. de altura, ramas cilíndricas, purpúreas, viscoso-pubescentes. Hojas opuestas, angostas, lanceoladas sublineares, con la base atenuada, consistencia papirácea, miden 5-12 cm de largo. Inflorescencia corimbosa terminal; cabezuelas subsésiles, con los pedúnculos muy cortos; involucro de brácteas verdes, a veces morenas, pilosas ciliadas, de 6-7 mm de largo; flores blancas. Aquenios de unos 4 mm con el vilano de 3 cerdas. Hierba perenne.

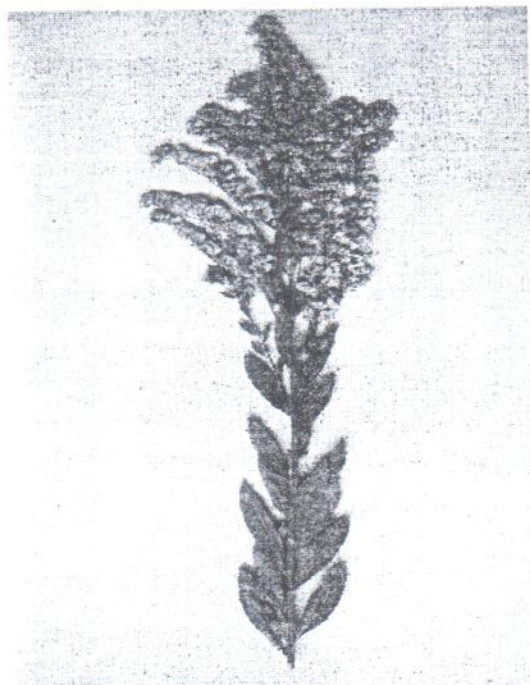
Esta especie se encontró en sitios con pH de 8.11; en suelos de textura franco-arenosa; con porcentaje de materia orgánica pobre 0.13. La ordenación triangular indica que es una especie con estrategia C-S. Su distribución fue variable.



Dyssodia papposa (Vent.) Hiltchc

Plantas anuales, erectas o algo extendidas, de 70 cm de alto; tallo a menudo ramificado desde la base, a veces solitario, glabro o algo pubescente; hojas en su mayoría opuestas, de 1.5 a 5 cm de largo; flores líguladas amarillo-anaranjadas; corolas amarillentas, aquenios angostamente piramidales negruzcos; habita en matorrales xerófilos, pastizales.

Esta especie habita en sitios con pH de 7.70 a 8.29; en suelos de textura franco-arenosa y areno-francosa; sin materia orgánica. De acuerdo a la ordenación triangular es una especie con estrategia C-S-R. Su distribución fue concentrada.



***Solidago scabrida* DC.**

Planta herbácea perenne, hasta de 1m de alto; tallos densamente pubérulos a velutinos; hojas sésiles o subsésiles, lanceoladas a oblongas u oblanceoladas; flores liguladas de 6 a 12; aquenios cilíndricos, de 1.5 mm de largo.

En el área de estudio la especie habita en sitios con pH de 7.7; en suelos de textura areno-francosa y sin materia orgánica. De acuerdo con la ordenación triangular es una especie con estrategia C-S. Su distribución fue variable.



***Bromus uniloides* Kunth**

Planta herbácea perenne; tallos erectos de 0.25 a 1.3 m de alto nudos y entrenudos glabros; vainas foliares más cortas o poco más largas que los entrenudos, lígulas no membranáceas, blancas de 4-12 flores. Maleza ruderal y arvense.

Esta especie se localizo en sitios con pH de 8.11, en suelos de textura franco-arenosa; sin materia orgánica. De acuerdo con la ordenación triangular es una especie con estrategia C-S-R. Su distribución fue variable.



***Bouteloua curtipendula* (Michx.) Torr**

Planta herbácea perenne con rizoma, hasta de 1m de alto, más o menos ampliamente amacollado, a veces con rizomas o estolones; hojas en su mayoría concentradas hacia la base de la planta; inflorescencia estrecha y alargada; flor rudimentaria; habita en pastizales y matorrales xerófilos en suelos poco profundos.

Esta especie crece, en sitios con pH de 8.11, en suelos de textura franco-arenosa, sin materia orgánica. La ordenación triangular muestra que es una especie con estrategia C-R. Su distribución fue variable.



***Stipa tenuissima* Trin.**

Planta herbácea, perenne, erguida, tallo de 30 a 70 cm de alto erectos cespitosos, con 1 a 3 nudos glabros, entrenudos glabros o escabrosos; vaina foliar glabra o escabrosa.

En el área estudiada la especie ocupa sitios con pH de 8.11, en suelos de textura franco-arenosa y sin materia orgánica. De acuerdo con la ordenación triangular es una especie con estrategia C-S-R. Su distribución fue variable.



***Salvia* L.**

Arbustos, subarbustos o plantas herbáceas anual de 20 cm a 1.5 m a menudo aromáticos; hojas opuestas o a veces verticiladas, flores por lo general dispuestas en verticilos formando espigas (con frecuencias interrumpidas), rara vez en racimos o panículas, corola azul, maleza ruderal.

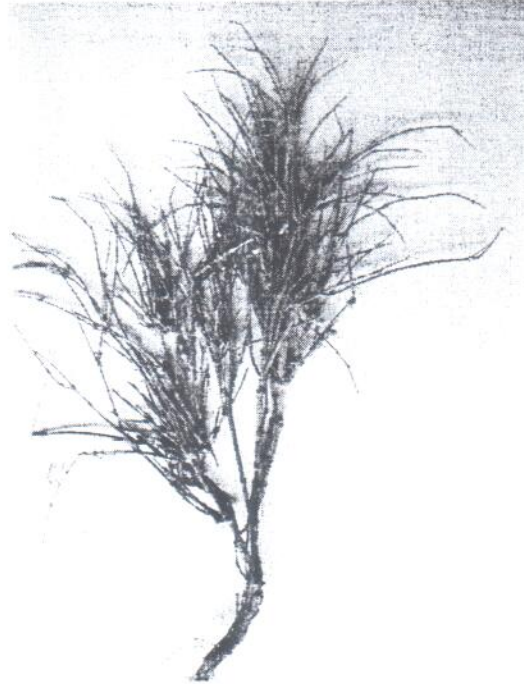
Esta especie se localizo en sitios con pH entre 7.70 y 8.46; en suelos de textura franco-arenosa, franco-limosa y areno-francosa; y sin materia orgánica. De acuerdo a la ordenación triangular es una especie con estrategia C-S. Su distribución fue variable.



Euphorbia furcillata Kunth.

Planta herbácea perenne o subarborescente, de olor desagradable, glabra, algo glauca, erecta o ascendente de 15 cm hasta 1.5 m de alto; raíz leñosa; base del tallo con frecuencia también leñosa; hojas alternas subsésiles, lineares a oblanceoladas y oblongo-lanceoladas. Inflorescencias amarillentas, habita sitios perturbados.

Esta especie se encuentra en sitios con pH de 8.11; en suelos de textura franco-arenosa y sin materia orgánica. La ordenación triangular indica que es una especie con estrategia S. Su distribución fue variable.



***Ephedra compacta* Rose.**

Arbusto de 30 a 50 cm de altura, muy ramificado, de color verde pálido; fruto rojo, carnosos; hojas reducidas a escamas. Especie característica de zonas áridas y semiáridas. Actualmente se extrae de esta especie de planta una sustancia estimulante llamada efedrina.

Se presenta en sitios con pH de 8.11; en suelos de textura franco-arenosa y sin materia orgánica. De acuerdo con la ordenación triangular es una especie con estrategia C. Su distribución fue concentrada.



***Cucurbita foetidissima* Kunth.**

Hierba rastrera, de superficie áspera. Hojas pecioladas, con el limbo palmatibulado, miden 12-13 cm de largo, por 12-13 de ancho, ásperas en las dos caras. Flores amarillas de 6-8 cm de largo. Fruto carnoso, con la cubierta más o menos dura, hierbas anuales, despide muy mal olor.

En el área de estudio se encontró en sitios con pH de entre 7.65 y 8.11; en suelos de textura areno-francosa, franco-arenosa y sin materia orgánica. De acuerdo con la ordenación triangular es una especie con estrategia C. Su distribución fue variable.



***Solanum elaeagnifolium* Cav.**

Arbusto de 40-60 cm de altura con los tallos cenicientos y espinosos con abundante tomento; hojas pecioladas oblongas, con el borde ondulado ceniciento; flores encimas terminales, con las corolas moradas, hierbas perennes, de rizomas subterráneos, profundos; fruto una baya globosa, anaranjada; habita en regiones secas.

Esta especie se encuentro en sitios con pH entre 7.65 y 8.46; en suelos de textura franco-arenosa, franco-limosa y areno-francosa; y escaso porcentaje de materia orgánica 0.13. En la ordenación triangular es una especie con estrategia C-S-R. Su distribución fue concentrada.



***Solanum nigrescences* M. Martens & Galeotti.**

Plantas herbáceas de 0.5-2 m de alto, a menudo extendidas o algo escandentes; tallos pubescentes con pelos simples hasta 0.5 mm de largo; hojas ovadas, de 4-10 cm de largo, 2-6 cm de ancho; inflorescencias extra-axilares, simples, racemosas; fruto una baya globosa de semillas numerosas; planta ruderal, crece en sitios perturbados.

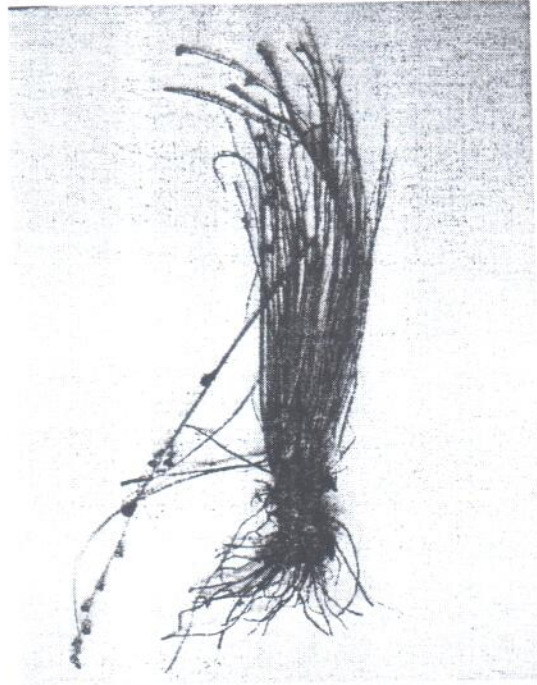
Esta especie se presentó en sitios con pH entre 7.65 y 8.29; en suelos de textura franco-arenosa y areno-francosa y con escaso porcentaje de materia orgánica 0.13. De acuerdo con la ordenación triangular es una especie con estrategia C-R. Su distribución fue variable.



Nicotiana glauca Graham.

Arbustos o árboles pequeños de 2-6 m de alto, de madera blanda; tallos jóvenes verdes o púrpuras, glabros, glaucos; hojas con lámina cordado-ovada, elíptica o lanceolada; inflorescencias paniculadas; fruto una cápsula parda ampliamente elipsoide; semillas angulares; flores amarillas; habita en áreas, secas y perturbadas; planta ruderal.

Esta especie crece en sitios con pH de 7.65 a 8.29, en suelos de textura areno-francosa y franco-arenosa; con escaso porcentaje de materia orgánica 0.13. La ordenación triangular indica que la especie tiene una estrategia R. Su distribución fue variable.



***Asphodelus fistulosus* L.**

Hierba perenne, hasta de 65 cm de altura, de rizomas cortos, tallos subcilíndricos; hojas laminares lineales hasta de 25 cm de longitud, vainas de 2.0 a 4.5 cm de largo, membranoso-escariosas; flores anchamente campanuladas, blancas; semillas de 3 mm de longitud café-grisáceas. Hierba introducida característica de áreas perturbadas.

En el área de estudio se encontró en sitios con pH de 7.65 a 8.46, en suelos de textura franco-arenosa, franco-limosa y areno-francosa, y con escasa materia orgánica. De acuerdo con la ordenación triangular es una especie con estrategia C-S-R. Su distribución fue concentrada.



***Reseda luteola* L.**

Hierba anual, cosmopolita, robusta, que mide 60-80 cm de altura, con los tallos lampiños, ramosos, erectos. Hojas alternas, enteras, atenuadas, angostamente elípticas, de margen ondulado; las mayores miden unos 13 cm de largo, a veces más; corola blanquecina; fruto capsular, rodeado por un cáliz persistente. Crece en forma espontánea en todas partes.

Esta especie se encontró en sitios con pH de 8.46, en suelos de textura franco-limosa y sin materia orgánica. De acuerdo con la ordenación triangular es una especie con estrategia C-R. Su distribución fue variable.



Gaura coccinea Pursh.

Hierba ramosa que mide 40-50 cm de altura, con las ramas vellosas y las hojas subsésiles, oblongas-lanceoladas, de borde abiertamente dentado, miden 2-5 cm de largo, por 3-6 mm de ancho. Racimos terminales con las brácteas florales de 4-5 mm. Flores rosadas de unos 10-12 mm de diámetro. Frutitos pedunculados, subalados, claviformes, de 1.5 cm de largo. Florece en julio y agosto.

Esta especie se encuentra en sitios con pH de 8.11, en suelos de textura franco-arenosa y sin materia orgánica. La ordenación triangular indica para esta especie una estrategia S. Su distribución fue concentrada.



***Escholtzia californica* Cham.**

Planta herbácea con látex; hojas alternas simples flores solitarias pétalos de 4 a 6 libres; fruto aquenios indehiscentes monospermos; cáliz cónico de una sola pieza, se cultiva por sus flores ornamentales.

Esta especie se encontró en sitios con pH que vario de 7.70 a 8.46, sobre suelos de textura franco-arenosa, franco-limosa y areno-francosa, y sin materia orgánica. La ordenación triangular indica que es una especie con estrategia C-S-R. Su distribución fue concentrada.



***Argemone mexicana* L.**

Hierba anual o perenne de vida corta; gláuca con látex amarillo o anaranjado; de 30 cm a 1.2 m de alto; provista de espinas rectas blanquecinas ampliamente espaciadas, crece por lo regular en áreas alteradas.

Esta especie se encontró en sitios con pH de 7.70 a 8.29, en suelos de textura franco-arenosa y areno-francosa, y sin materia orgánica. De acuerdo con la ordenación triangular es una especie con estrategia C-S-R. Su distribución es concentrada.



***Schinus molle* L.**

Árbol siempre verde, con las ramas colgantes, mide 4-8 m de altura. Hojas alternas, imparipinadas, con 7-13 folíolos, forma linear-lanceolada, finamente aserrados. Flores paniculadas, pequeñas de color amarillo-verdoso. Florece de marzo a mayo.

Esta especie se localizo en sitios con pH de 7.70 a 8.11, en suelos de textura franco-arenosa y areno-francosa, y sin materia orgánica. La ordenación triangular indica que es una especie con estrategia C-S-R. Su distribución es concentrada.



***Salsola kali* L.**

Hierba anual o perenne, de 30 cm a 1 m de altura, glabra o algo pubescente; tallos estriados, a veces rojizos, densamente ramificados dando a la planta el aspecto general de una cúpula; hojas con el ápice puntiagudo y la base envolvente, las superiores más cortas y más anchas que las inferiores, fruto de 3 a 6 mm de ancho, rojizo; semillas de color oscuro. Es una maleza perjudicial, nativa de Asia.

Esta especie se localizó en sitios con pH de 7.70 a 8.46, en suelos de textura franco-arenosa, franco-limosa y areno-francosa, y sin materia orgánica. De acuerdo con la ordenación triangular es una especie con estrategia R. Su distribución fue variable.



***Parthenium hysterophorus* L.**

Hierba anual, de 30-50 cm de altura, erecta ramosa con las ramas estriadas y pubescentes. Hojas bipinatífidas, con los segmentos lineares, obtusos, pubescentes, miden 4-2 cm de largo, por 3-6 de ancho. Capítulos numerosos, pedicelados, corimbosos, de 3-5 mm de diámetro; brácteas biseriadas, 5 externas y 5 internas. Flores blancas, las marginales en número de 5, femeninas, con la lígula orbicular, de un milímetro. Aquenios deprimidos, de color negro de unos 2 mm de largo.

En el área de estudio la especie se encontró en sitios con pH de 7.65 a 8.46, en suelos de textura franco-limosa y Areno-francosa, y con escasa materia orgánica. De acuerdo a la ordenación triangular es una especie con estrategia S-R. Su distribución fue concentrada.



***Marrubium vulgare* L.**

Planta herbácea perenne; tallos por lo común tomentosos o lanoso, con pelos simples y estrellados erectos o ascendentes, hasta de 1 m de alto, pero por lo general mucho más corto; hojas con pecíolos lanosos de 0.5 a 3.5 cm de largo, subsésiles las de la parte superior, ápice obtuso o redondeado, borde crenado, pubescencia lanosa, principalmente en el envés. Flores pequeñas, con las corolas blancas, agrupadas en racimos axilares muy densos. Florece a partir del mes de julio, su época de floración se prolonga hasta el mes de noviembre.

Esta especie se localizó en sitios con pH de 7.65, en suelos de textura arenofrancisca y porcentaje de materia orgánica de 0.13. De acuerdo con la ordenación triangular es una especie con estrategia S-R. Su distribución fue concentrada.



Opuntia pumila Rose.

Planta con artículos que se desprenden fácilmente de 6 a 20 cm de longitud y de 1 a 1.5 cm de diámetro, cilíndricos o ligeramente aplanados turgentes, con tubérculos más o menos prominentes. Areolas pequeñas, al principio con 2 espinas; flores amarillas con el tiempo con tinte rosado; pericarpelo pubescente, con pocas espinas o sien ellas; fruto globoso rojizo, de 15 mm de longitud, planta perenne.

Esta especie se localizó en sitios con pH de 8.46, en suelos de textura franco-limosa y sin materia orgánica. La ordenación triangular indica para esta especie una estrategia S. Su distribución fue concentrada.

6. DISCUSIÓN

En este estudio se contabilizaron un total de 34 especies las cuales se clasifican de acuerdo con Pianka (1982) como buenas colonizadoras, también denominadas estrategias *r* o plantas oportunistas. Entre los factores más relacionados con la escasa colonización de plantas se encuentra la condición física del suelo: su grado de compactación, la carencia de nutrimentos, las pendientes pronunciadas, la cantidad de arcilla, que impide la penetración del agua de lluvia al sistema radicular. Otros factores importantes son las condiciones climáticas y ecológicas de las zonas áridas. Grime (1982) considera que no existen especies vegetales que sean a la vez buenas colonizadoras y adaptadas a un hábitat de stress hídrico: condiciones que se presentan en los jales de la mina de La Paz.

De acuerdo con Granados (2000), las especies colonizadoras de hábitats vacíos tan especiales, tienen que vencer en primer lugar la barrera de la distancia y superar además lo impredecible de la colonización y la transitoriedad del nicho. Algunas adaptaciones que han sido favorecidas por la selección natural para superar estos obstáculos son: producir un gran número de semillas por planta y tener propágulos que puedan diseminarse a grandes distancias mediante mecanismos de dispersión específicos; los ejemplos más notorios son las especies *Opuntia pumila*, *Schinus molle*, *Salsola kali* y *Nicotiana glauca*.

Un aspecto importante del estudio fue el predominio de especies de Asteraceae, que tienen entre sus características principales ser buenas

invasoras de ambientes perturbados, producir una gran cantidad de semillas pequeñas, presentar formas de vida herbáceas y ser hemicriptófitas. Las especies hemicriptófitas pierden las partes aéreas en los períodos críticos del año, lo que les permite adaptarse a las condiciones de carencia de agua y también escapar de otros factores que ponen en peligro su supervivencia en estos hábitats.

Harper (1976) propuso el concepto de "sitio seguro" para referirse a una zona en la cual hay condiciones apropiadas para la germinación y la supervivencia de la planta. El sitio seguro provee de estímulos para desbloquear la latencia de la semilla, favorece la germinación y brinda protección contra depredadores, competidores, patógenos y toxinas. Sánchez (2002) menciona que las semillas de las especies colonizadoras son polimórficas es decir, tienen respuestas diferentes a condiciones ambientales específicas, por lo que aún cuando existan condiciones favorables para la germinación, esta tiende a ser intermitente.

Las especies vegetales analizadas tienen distintas preferencias ambientales: algunas crecen en las partes planas, otras en las escorrentías y otras en sitios donde hay acumulación de materia orgánica. Las semillas de las diferentes especies presentan un comportamiento semejante pues tienen diferentes requerimientos para su germinación.

Algunas plantas que se presentaron en el jale de la mina de La Paz, tienen características de plantas colonizadoras, poseen órganos de almacenamiento

(rizomas, tubérculos, raíces pivotantes y fibrosas), además de una fenología y capacidad de expansión lateral que les ayudan a permanecer y sobrevivir hasta la estación de crecimiento favorable y a evadir o escapar de las condiciones adversas. Ejemplo de lo anterior es *Cucurbita foetidissima* (Calabacita loca), la cual en los días secos permanece en latencia y gracias a su rizoma crece y se desarrolla cuando se dan las condiciones propicias y hay disponibilidad de nutrientes. Además tiene una gran capacidad de expansión lateral, pues se encontraron ejemplares que ocupaban una gran extensión de terreno.

Otra especie oportunista y buena colonizadora de sitios degradados fue *Nicotiana glauca*, esta planta presenta una gran raíz pivotante que le permite colonizar sitios con pendientes pronunciadas tales como las laderas y sus semillas se dispersan con facilidad. Esta especie, conocida como “tabaquillo” invade hábitat donde el suelo ha sido perturbado, por lo que se posee algunas de las principales características que menciona Grime (1982) en las especies colonizadoras: presenta un sistema radicular poderoso, leñoso y succulento que penetra en las pequeñas fisuras del suelo a grandes profundidades para aprovechar reservas de humedad que son inaccesibles a gramíneas y otras plantas de raíces poco profundas. Un rasgo adicional es su capacidad para la regeneración del brote a partir de yemas situadas cerca de la parte superior de la raíz principal y la producción de miles de semillas pequeñas, que le permiten dispersarse a grandes distancias por la acción del viento.

Otro tipo de estrategia que utilizan las plantas para sobrevivir es la fenología como es el caso de *Marrubium vulgare* y *Argemone mexicana* estas plantas se caracterizan por el aprovechamiento de los recursos nutricionales; cuando otras especies permanecen en latencia, estas especies crecen y se desarrollan en época de invierno produciendo una gran cantidad de vástagos.

Grime (1982) considera que las características que están asociadas con la capacidad de colonización incluyen: poseer una gran cantidad de reservas acumuladas en órganos de propagación vegetativa o de almacenaje que conducen a una rápida expansión del follaje, contar con un sistema aéreo y subterráneo vigoroso y de rápido crecimiento, tener un tipo de fenología que les permita aprovechar los recursos del ambiente: esta habilidad es llamada comúnmente competencia. En términos de estrategia de adaptación tanto las especies competitivas como las ruderales poseen una tasa de crecimiento relativo elevada. Esta característica está altamente correlacionada con la explotación oportunista de los hábitats perturbados y representa también una tendencia general entre las especies que conforman los primeros estadios de la sucesión.

Ash *et al.* (1994) plantean que la presencia de poblaciones de especies de plantas en un sitio particular depende de la capacidad tanto de los propágulos (para ser transportados al sitio para la germinación), como de las plantas jóvenes (para sobrevivir y reproducirse). Una de las especies estudiadas que se ajusta a estas características es *Asphodelus fistulosus*, especie perenne y

exótica que se adapta fácilmente a las zonas perturbadas; en el sitio 1 su densidad fue muy alta (1003 individuos), probablemente algunos atributos del suelo tales como el pH, la concentración de nutrimentos (como el calcio y el fósforo), la cantidad de materia orgánica y la presencia de hongos micorrizicos influyeron en la colonización de los individuos de esta especie en los sitios metalíferos (Álvarez *et al.*, 1994).

En hábitat improductivos hay poca oportunidad para que las reacciones fenológicas o morfogenéticas de las plantas proporcionen mecanismos efectivos para evitar las presiones restrictivas. El efecto mas notorio de una restricción rigurosa y continua es el de eliminar o debilitar a las especies de alta capacidad competitiva y favorecer su reemplazo por especies capaces de tolerar las formas de restricción predominantes (Grime, 1982).

En zonas áridas y semiáridas la forma de vital de las especies es una característica fundamental que les permite ser buenas colonizadoras y adaptarse al stress resultante de las altas temperaturas en verano, las bajas temperaturas en invierno y a la escasa precipitación. En este trabajo se observaron formas de vida diversas entre las que destacan las caméfitas, seguidas de las hemicriptófitas y por último las terófitas (Granados y Tapia, 1990; Terradas, 2001).

Entre las gramíneas que se presentaron destacan *Bromus unioloides*, *Stipa tenuísima* y *Bouteloua curtipendula*, estas especies se presentaron en forma de macollos, con raíces fibrosas y con densidad baja.

Johnson *et al.*, (1994) mencionan que la naturaleza física y química de los sustratos resultantes de la operación de las minas son la base fundamental para la restauración y el establecimiento de la vegetación, debido a que actúan de manera negativa.

Las variables ambientales: pH, K, Mg y arena mostraron valores de correlación significativa con los sitios de muestreo (o con la distribución de las especies) y con los primeros ejes de la ordenación, y están correlacionadas con otras variables ambientales. La acción de estas variables (pH, K y Mg) puede restringir la distribución de las especies al influir sobre la disponibilidad de macronutrientes y el porcentaje de arena se relaciona con la porosidad del suelo y, por lo tanto, con la disponibilidad de agua para las plantas (Sanchez-González y Granados Sánchez, 2003).

En lo referente a la Ordenación Triangular de las especies herbáceas, anuales y perennes encontradas en el área de estudio las especies en su mayoría se ubicaron en la estrategia "C-S-R", plantas confinadas a hábitats en el cuál la competencia esta restringida por intensidades moderadas por la combinación de efectos de estrés y disturbio. Los resultados obtenidos sugieren que uno de los factores de mayor importancia para el desarrollo de las especies es el ambiente seco. Por lo tanto, tienden a ser restrictivas y ruderales con más frecuencia, algunas especies fueron totalmente ruderales (*Baccharis conferta*, *Salsola kali* y *Bidens odorata*), otras fueron tolerantes al estrés (*Gaura*

coccinea) y en lo referente a las competidoras se encontraron dos especies:

Cucurbita foetidissima y *Ephedra compacta*.

7. CONCLUSIONES

Los jales son un problema mundial y en México pues a pesar de su antigüedad no se les ha dado un uso apropiado y por los elementos tóxicos que contienen son una fuente de contaminación ambiental.

En las explotaciones mineras, la molienda para extraer el mineral produce residuos edáficos extremadamente pulverizados que forman suelos compactados, con una textura arcillo-limosa que impide la germinación de las semillas y el desarrollo radicular, de tal manera que el paso inicial para la recuperación de estos sitios es la modificación de las características físico-químicas del sustrato.

Para la restauración de jales de minas es necesario preparar el terreno, mediante procesos físicos (terraceado, arado, rastrillado), químicos y biológicos. En terrenos muy empobrecidos las primeras labores a realizar son la inoculación con hongos para favorecer la formación de micorrizas y proveer de sitios de captura de agua en donde ocurra la germinación.

La naturaleza física y química de los sustratos contenidos en los jales de las minas es la base fundamental para la restauración y el establecimiento de la vegetación, por ello se recomienda realizar estudios de las características físicas y químicas del suelo.

Como producto de un largo proceso evolutivo las especies vegetales poseen varias estrategias para colonizar espacios vacíos. En la colonización de los jales mineros de la Sierra de Catorce, San Luís Potosí, las especies utilizan estrategias como la competencia por los nutrimentos del suelo y la ocupación de sitios particulares de germinación: las plantas requieren de sitios de geminación que les proporcionen nutrimentos y humedad (sitios seguros) para poder desarrollarse y colonizar con éxito los jales de mina.

Existen pocas propuestas para estudiar y sistematizar a las plantas colonizadoras de los jales de minas por lo que este trabajo es una contribución al estudio de las estrategias de colonización de la especies pioneras y, por lo tanto, es básico para proponer programas de restauración.

Dado que la colonización y sucesión natural en los jales de minas requiere demasiado tiempo, es necesario iniciar programas de restauración a corto plazo para disminuir esta fuente de contaminación.

Ante la importancia de las especies analizadas para la restauración de los jales de minas y dada la escasa información existente sobre las mismas, se sugiere iniciar un catálogo que incluya su descripción botánica y realizar experimentos de laboratorio o de campo controlados para seleccionar las especies más apropiadas para la restauración.

Las plantas ruderales se deben denominarse “malas hierbas” pues son fundamentales para la restauración de los ecosistemas.

Entre las diferentes estrategias de supervivencia que poseen las plantas, la estrategia ruderal juega un papel fundamental en el proceso de restauración natural y artificial de los ecosistemas.

8. BIBLIOGRAFÍA

Abdelouas, A; W. Lutze And H.E. Nuttall. 1999. Uranium Contamination in the Subsurface: Characterization and Remediation, In: Uranium: Mineralogy, Geochemistry and the environment, Ed. by Burns P.C. & Finch R. pp 679. y pp 433-473.

Austin, M. P., and T. M. Smith. 1989. A new model for the continuum concept. *Vegetatio*. 83: 35-47.

Bailon, H. A. 1990. XIII Congreso Español de Toxicología. Granada, 22-24 de Septiembre, 1999. *Rev. Toxicol.* 16:140-141.

Binckley, D. 1993. *Nutrición Forestal. Prácticas de Manejo*. LIMUSA- México. 340 pp.

Bradshaw, A. D. 1987. Restoration: An acid test for ecology. In Jordan III, M. E, Gilpin y J. D. Aber, editores. *Restoration ecology: A synthetic approach to ecological* Cambridge University Press. New York, N.Y.

Brañes R. 1994. *Manual de Derecho Ambiental Mexicano.- Fundación mexicana para la educación Ambiental fondo de cultura Económica.- México.- 792 pp.*

Bonetto J., P; C. López S. 2005. Posibilidades de aplicación de la Fitorremediación en la Minería de Uranio. Grupo Agronómico. Aplicaciones Tecnológicas y Agropecuarias, Centro Atómico Ezeiza, CNEA. [//www.cnea.edu.ar/las-ans/pdf/JPBonetto-trabajo-simposio.pdf](http://www.cnea.edu.ar/las-ans/pdf/JPBonetto-trabajo-simposio.pdf).

Cario P., U. 1993. Terminología técnica forestal.- Tesis de Licenciatura.- Chapingo- Chapingo, México.- 475 pp.

Cetenal 1970. Comisión de Estudios del Territorio. Secretaría de la Presidencia. Cartas: topográfica, geológica, edafología, de uso potencial, de vegetación y de uso del suelo F14 A24. México, D.F.

Cooke, J. A. and M. S. Johnson. 2002. Ecological restoration of land with particular reference to the mining of metals and industrial minerals: A review of theory and practice. *Environmental Review* 10: 41-71.

Covington W., Z; T. M. Fulé; Alcote, and R. K. Vance. 2000. Learning by doing education in ecological restoration at Northern Arizona. *Journal of Forestry*. 98: 30-34

Curato M. R.; D. Tortosa N.; Bartoloni. 2005. Situacion Ambiental Argentina Tratamiento De Liquidos Fitorremediacion: Empleo De Discaria Americana. (Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires) y L.Valiente y M. Puelles (CEQUIPE-INTI). [//www. dsostenible.com.ar/tecnologias/fitorreme.html](http://www.dsostenible.com.ar/tecnologias/fitorreme.html) - 26k

Czapowskyj, M. M. 1973. Establishing forest on surface-mined land as related to fertility and fertilization. In. Symp. For fertilization. USDA. For ser. Gen. Rep. Tec. NE-3 132-139pp

Díaz Ch., R., y L. Camargo R. 1995. Restauración ecológica: ¿Herramienta o teoría ecológica? *Tópicos de investigación y postgrado* 1995 IV (4):230-234

Dushenkov, S; D. Vasudev; Y; G. D. Kapulnik; D. K.C. Fleisher; and B. Ensley 1997. Removal of Uranium from Water Using Terrestrial Plants. *Environmental Science and Technology* 31, 3468-3474.

Ebbs, S.D; D.J. Brady and L.V. Kochian. 1998. Role of Uranium Speciation in the Uptake and Translocation of Uranium by Plants. *Journal of Experimental Botany* 49: 1183-1190.

Ewel, J.J. 1987. Restoration is the ultimate test of ecological theory. *In*: Jordan III, M. E, Gilpin y J. D. Aber, editores. *Restoration ecology: A synthetic approach to ecological* Cambridge University Press. New York, N.Y.

Enciclopedia de los Municipios de San Luis Potosí. 1988. Centro nacional de Estudios municipales; Talleres gráficos de la nación. 50-54 pp.

FAUBA 1999. Technical Options for the Remediation of Contaminated Groundwater. Ed. by International Atomic Energy Agency. 129 pp.

Fernández, S. J. M; G. Ruíz A. y R. Rodríguez V. 1998. La biorremediación como alternativa al tratamiento de suelos contaminados: *In* Avance y Perspectiva. UNAM. 17: 293-302

Flores M. 1985. Manual de ecología. Trillas. México. 266 pp.

Franco L., J., G. de Cruz G., A. Cruz G., A. Rocha R. N. Navarrete S., G.

Gardner, J. 2001. Rehabilitación de minas para el mejor uso del terreno: la minería de bauxita en el bosque de Jarrah de Australia Occidental. *In* Unasylva. Rehabilitación de espacios degradados. FAO. 52:1-8

García, E. 1971. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía UNAM. México.

Granados S., D. 2000. Apuntes del curso de Restauración de Ecosistemas Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. DICIFO. S/P.

Granados S., D. y R. Tapia V. 1990. Comunidades Vegetales. Universidad Autónoma Chapingo. 224 pp.

Granados S., D. y G. López R. 2000. Sucesión Ecológica. Dinámica del Ecosistema.- Chapingo.- Chapingo, Estado de México.- 197 pp.

Gilpin y J.D. Aber, editors. Restoration ecology: A synthetic approach to ecological. Cambridge University Press. New York, N.Y.

Grime, J. P. 1982. Estrategias de adaptación de las plantas y procesos que controlan la vegetación. Limusa.- México.- 291.

González P., M. 2004. Biorremediación. Consejo Argentino para la Información y el desarrollo de la Biotecnología.
[//www.es.wikipedia.org/wiki/Biorremediación](http://www.es.wikipedia.org/wiki/Biorremediación) "

Goswami, S.C; K.L. Gulati; K.K. Nagpaul. 1977. Estimation of Uranium and Boron Contents in plants and Soils by Nuclear Particle Etch Technique. *Plant and Soil* 48, 709-717.

Gutiérrez C., J. 2002. Propuesta de restauración de terrenos comunales de Ecatzingo, estado de México. Tesis de Lic. División de Ciencias Forestales. Chapingo. México 88pp.

Hernández S., *et. a.*, 1988. Caracterización de suelos y aguas y sus posibles usos en el área del Salado, Estados de Zacatecas y San Luis Potosí. *Geografía y Desarrollo* I (2): 19-26.

Huang, J.W; M.J. Blaylock; Y. Kapulnik And B.D. Ensley. 1998. Phytoremediation of Uranium-Contaminated Soils: Role of Organic Acids in Triggering Uranium hyperaccumulation in Plants. *Environmental Science and Technology* 32, 2004-2008.

Humara G., G. 1967. Estudio Geológico del extremo nor-oriental de la Sierra del Tunal Municipio del Cedral. Tesis de Ing. Geólogo. Escuela de Ingeniería, U.A.S.L.P., México.

I.N.E.G.I. 1995. Anuario estadístico del estado de San Luis Potosí. Gobierno del estado de San Luis Potosí. México.

I.N.E.G.I. 1994. Anuario estadístico del estado de San Luis Potosí. Gobierno del estado de San Luis Potosí. México.

I.N.E.G.I. 1990. Anuario estadístico del estado de San Luis Potosí. Gobierno del estado de San Luis Potosí. México.

Jordan III. W. R., M. E. Gilpin, and J. D. Aber. 1987. Restoration ecology: ecological restoration as a technique for Basic research. *In*: Jordan III, M.E.,

Kabatta-Pendias A. and H. Pendias (1984). Trace Elements in Soils and Plants. CRC press, Boca Raton, USA. pp 149-150

Kumar, N; V. Dushenkov; H. Motto and I. Raskin. 1995. Phytoextraction: The use of Plants to Remove Heavy Metals from Soils. *Environmental Science and Technology* 29, 1232-1238.

Łaska, G. 2001. The disturbance and vegetation dynamics: a review and an alternative framework. *Plant Ecology* 157: 77-99.

Magurran, A. E. 1988. Ecological diversity and its measurement. Princeton University Press, New Jersey. 200 pp.

Márquez H., R. 1999. Regeneración de la vegetación en distintos ensayos de restauración de minas de roca caliza a cielo abierto en una industria cementera, Ixtaczoquitlán Veracruz. Tesis de Lic. Instituto de Ecología A.C. Xalapa, México. 150 pp.

Márquez H., R. 2003. Restauración Ecológica. Instituto Nacional de Ecología. [//www.ine.gob.mx/dgoece/con_eco/conhnc/webredine.html](http://www.ine.gob.mx/dgoece/con_eco/conhnc/webredine.html)

Mateucci D., S. y A. Colma 1982. Metodología para el Estudio de la Vegetación. Monografía no. 22. OEA. Washington, D.C. 167 pp.

McCune, B. and J.B. Grace, 2002. Analysis of ecological communities. MjM Software Design, Gleneden Beach, Oregon.

McCune, B. and M.J. Mefford.1999. PC-ORD. Multivariate Analysis of Ecological Data. Versión 4 for Windows. MjM. Software Desig. Gleneden Beach, Oregon. 237 pp.

Mcquillan, A.G. 1998. Defending the ethics of ecological restoration. Journal of Forestry. 96(1):27-31.

Medina-Rivero J. F. 1983. Estudio hidrogeológico en Wadley, municipio de Catorce, S.L.P. Folleto técnico no. 86: Instituto d Geología y Metalurgia. Univ. Aut. San Luis Potosí, México. 25 pp.

Meffé, G.K. and C.R. Carroll. 1994. Principles of Conservation Biology. Sinauer Associates, Inc. Sundrlan, Massachussets.

Morgan R., P. 1997. Erosión y Conservación del Suelo. Trad. Por Urbano Terrón y J. de M. Urbano L. Mundi-Prensa, España. 375 pp,

Odum P., E. 1995. Ecología Peligro la Vida.- segunda edición.- Interamericana Mc. Graw-Hill.- México.- 268 pp.

Palmer, W. M. 1993 Putting things in even better order: The advantages of canonical correspondence analysis. Ecology 74: 2215-2230

Payá, H.F. 1995. Actividad Minera y Contaminación Ambiental. Fundación ambiente y Recursos naturales (FARN).
[//www.farn.org.ar/docs/PO4/Publicaciones 4-5.html](http://www.farn.org.ar/docs/PO4/Publicaciones%204-5.html)

Peñoles. 2001. Restauración de minas cerradas.
[//www.penoles.com.mx/pdf/penolesIAM-2001.pdf](http://www.penoles.com.mx/pdf/penolesIAM-2001.pdf)

Pianka, E.R. 1982. Ecología evolutiva. Omega. Barcelona

Pritchett W., L. 1986. Suelos forestales. Propiedades, conservación y Mejoramiento. LIMUSA- México. 634 pp.

Raskin I., and B., D. Ensley. 2000. Phytoremediation of toxic metals. Using Plants to Clean Up the Environment. John Wiley & Sons, INC. 304 pp.

Ribera, D; F. G. Labrot; Tisnerat and J.F. Narbonne. 1996. Uranium in the Environment: Occurrence, Transfer and Biological Effects. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology 146, 53-89.

Sánchez C., A. y M. Sánchez S. 1991 Reflexiones sobre los impactos físicos y socioeconómicos de las instalaciones mineras en México. UNAM. pp 67-73

Sánchez G., A. 1998. Clasificación y ordenación de la vegetación de la Sierra de Catorce, San Luis Potosí, Tesis Maestría en Ciencias. Escuela Nacional de Estudios Profesionales Iztacala, UNAM. Estado de México. 191 pp.

Sánchez G, A. y D. Granados S. 2003. Ordenación de la vegetación de la Sierra de Catorce, San Luis Potosí, a lo largo de gradientes ambientales. *Terra* 21: 311-319.

Saric, M.R; M. Stojanovic and M. Babic. 1995. Uranium in Plant Species Grown on Natural Barren Soil. *Journal of Plant Nutrition* 18, 1509-1518.

Sarrailh J., M. y N. Ayrault 200. Rehabilitación de los emplazamientos de las minas de níquel en Nueva Caledonia. *In Unasyva. Rehabilitación de Espacios Degradados*. FAO. 52: 15-20.

Schramm, J. E. 1966. Plant colonization studies on black wastes from athracite mining in Pennsylvania. *American Philosophical Society Transactions*. N.S 56 (1): 1-194.

Semarnap. 1998. Campaña de Restauración Ecológica y contra cambio de uso del suelo, en áreas afectadas por incendios forestales. Primera Edición Semarnap México, hoja desprendible.

Silva A., L.O. 1993. Uso de sacos de aniagem para revegetação de taludes na Ferteco Mineração S.A. Informativo SIF 1. Viçosa. Sociedade de investigações Forestais. Brasil.

Suárez M., J. 2003. Clasificación y ordenación de las comunidades vegetales del Sierra de San Joaquín, Querétaro en su vertiente Sur, Tesis de Lic. UNAM. Iztacala, México, D.F. 75 pp.

Swanson, A. P. 1994. Watershed restoration an the Chesapeake Bay. *Journal o Forestry*. 92(8):37-40.

Ter Braak, C.J.F. and P. Šmilauer, 1998. CANOCO. Referente Manual and User's Guide to Canoco for Windows: Software for Canonical Community Ordination (Version 4). Microcomputer Power. NewYork . NewYork 351 pp.

Terradas, J. 2001. *Ecología de la vegetación*. Omega. Barcelona, España. 703 pp.

Torres, S.M.G. 1979. Estudio geológico minero del área de San Bartola Taonas, Sierra de Catorce, S.L.P. trabajo recepcional, Escuela de Ingeniería U.A.S.L.P.

Toy T., J. and J.J. Griffith. 2001. Changing surface-mine reclamation practices in Minas Gerais, Brazil. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 15 (1): 33-51.

Trangsa y Tragsatec. 1998. Restauración hidrológico forestal. Ed. Mundi Prensa. Madrid, pp 11-35 y 62-80.

Ugalde A., J. A. 2004. Sucesión en los matorrales desérticos micrófitos de *Larrea tridentata* (Gobernadora) en la región de la Sierra de Catorce, San Luis Potosí. Tesis de Lic. Facultad de Estudios Superiores Iztacala. Los Reyes Iztacala. México. 76 pp.

Wall, K. R. 2000. Native knowledge for native ecosystems. *Journal of Forestry*. 98(8):4-9.

Walters, B. 1997. Human ecological questions for tropical restoration: experiences from planting native upland trees and mangroves in the Philippines. *Forest ecology and Management*. 99(1-2):275-290.

Wong, M. H. 2003. Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils. *Chemosphere* 50: 775- 778

9. ANEXOS

ANEXO 1. Análisis químicos del suelo

Sitio	pH	M.O %	P mg kg ⁻¹	K mg kg ⁻¹	Na mg kg ⁻¹	Ca Mg Kg ⁻¹	Mg Mg Kg ⁻¹	CIC cmol kg ⁻¹
1	7.65	0.13	13.00	84	25	3693	43	1.07
2	8.11	ND	2.04	94	29	3972	36	1.07
3	8.46	ND	3.49	62	61	3847	77	1.60
4	7.70	ND	3.20	22	15	3394	28	1.07
5	8.29	ND	3.20	38	21	3965	50	1.07

MO (materia orgánica), P (fósforo), K (potasio), Na (sodio), Ca (calcio) Mg (magnesio) CIC (capacidad de intercambio catiónico).

ANEXO 2. Análisis físicos del suelo

Sitio	Dap g/cm ³	Dr g/cm ³	Arena %	Limo %	Arcilla %	Textura
1	1.52	2.73	75.5	18.0	6.5	Arena-francoso
2	1.67	2.72	67.5	24.0	8.5	Franco-arenoso
3	1.61	2.71	27.5	64.0	8.5	Franco-limoso
4	1.56	2.74	83.5	14.0	2.5	Arena-francoso
5	1.67	2.75	62.8	30.7	6.5	Franco-arenoso

Dap (densidad aparente); Dr (densidad relativa).