



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
FACULTAD DE CIENCIAS**

**EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS AGROFORESTALES CON
LEGUMINOSAS NATIVAS EN LA RESTAURACIÓN DEL SUELO EN
LA MONTAÑA DE GUERRERO, MÉXICO**

TESIS

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS (ECOLOGÍA Y CIENCIAS
AMBIENTALES)**

PRESENTA

BIÓL. ESPERANZA HERNÁNDEZ CRUZ

**DIRECTOR DE TESIS: M. EN C. SERGIO PALACIOS MAYORGA
(Departamento de Edafología, Instituto de Geología, UNAM)**

**COMITÉ TUTOR: DR JORGE E. GAMA CASTRO
(Departamento de Edafología, Instituto de Geología, UNAM)
Dra. Ma. Virginia Cervantes Gutiérrez
(Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco)**

MÉXICO, D.F.

NOVIEMBRE, 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
FACULTAD DE CIENCIAS**

**EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS AGROFORESTALES CON
LEGUMINOSAS NATIVAS EN LA RESTAURACIÓN DEL SUELO EN
LA MONTAÑA DE GUERRERO, MÉXICO**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE
MAESTRA EN CIENCIAS (ECOLOGÍA Y CIENCIAS
AMBIENTALES)**

PRESENTA

BIÓL. ESPERANZA HERNÁNDEZ CRUZ

**DIRECTOR DE TESIS: M. EN C. SERGIO PALACIOS MAYORGA
(Departamento de Edafología, Instituto de Geología, UNAM)**

**COMITÉ TUTOR: DR JORGE E. GAMA CASTRO
(Departamento de Edafología, Instituto de Geología, UNAM)
DRA. MA. VIRGINIA CERVANTES GUTIÉRREZ
(Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco)**

MÉXICO, D.F.

NOVIEMBRE, 2013



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
FACULTAD DE CIENCIAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

OFICIO FCIE/DEP/615/13

ASUNTO: Asignación de Jurado

DR. ISIDRO ÁVILA MARTÍNEZ
DIRECTOR GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
P R E S E N T E.

At'n: DR. MANUEL ENRIQUE VÁZQUEZ VALDÉS.

Comunico a usted que el Comité Académico del Posgrado en Ciencias Biológicas ha asignado al(a) **BIOL. ESPERANZA HERNÁNDEZ CRUZ**, el jurado para presentar Examen de Grado de **MAESTRO(A) EN CIENCIAS (ECOLOGÍA Y CIENCIAS AMBIENTALES)**.

PRESIDENTE	M. EN C.	MA. JULIA CARABIAS LILLO
VOCAL	DR.	JORGE ENRIQUE GAMA CASTRO
SECRETARIO	DR.	JOHANNES CORNELIS VAN DER WAL
SUPLENTE	DR.	DIODORO GRANADOS SÁNCHEZ
SUPLENTE	DRA.	MARÍA VIRGINIA CERVANTES GUTIÉRREZ

El trabajo aprobado como tesis es:

"EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS AGROFORESTALES CON LEGUMINOSAS NATIVAS EN LA RESTAURACIÓN DEL SUELO EN LA MONTAÑA DE GUERRERO"

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria, D. F., 13 de noviembre del 2013
COORDINADORA DEL PROGRAMA

DRA. MARÍA DEL CORO ARIZMENDI ARRIAGA



MCAA\ASR\grf*

AGRADECIMIENTOS

Al posgrado en Ciencias Biológicas, por aceptarme en el posgrado y permitir titularme de la maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por la beca otorgada durante mis estudios de maestría.

Agradezco al Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza quien financió el proyecto de investigación-desarrollo de “Restauración ambiental con especies nativas para el uso sustentable de los recursos forestales” marco en el cual esta Tesis se efectuó.

Al M. en C. Sergio Palacios Mayorga mi director, le agradezco su apoyo y dedicación para concluir el escrito final, así como para la realización del trabajo de laboratorio.

A los miembros del comité tutor Dr. Jorge Enrique Gama Castro por su compromiso e inspiración para realizar este trabajo, a la Dra. María Virginia Cervantes Gutiérrez, por su amistad, incluirme en su proyecto de investigación, para el trabajo de campo, ayudarme a realizar los análisis estadísticos, y su total apoyo y compromiso para realizar ésta tesis.

A los otros miembros del jurado M. en C. Ma. Julia Carabias Lillo, quien ha sido mi maestra en todo mi desarrollo académico y profesional, ¡gracias por todo! al Dr. Johannes Cornelis Van der Wal y Dr. Diodoro Granados Sánchez por sus valiosos comentarios y revisión de la tesis.

A Eligio donde quiera que te encuentres, agradezco tu apoyo al muestreo de campo y para las láminas micromorfológicas.

AGRADECIMIENTOS A TÍTULO PERSONAL

A mi padre, que siempre te llevo en mi corazón y a mi Madre, que el tiempo te ha vencido y que a pesar de eso todavía te tengo.

Les dedico en especial este escrito tan difícil de concluir, a todas mis sobrinas y sobrinos, desde Male la sobrina mayor, hasta Carolinita la más pequeña; ojala sea una inspiración para todos y todas, que los motive a ser brillantes, a ser mejores seres humanos y concluir su carrera aquellos que están estudiando, para los que ya son profesionistas a ser mejores en su desarrollo profesional.

También quiero hacer un homenaje a toda mi familia con la cita del **abuelo Vito**; que es un fragmento tomado del libro: El niño que come luna escrito por Dionisio Hernández Ramos (Editor GiFri, 1999. 64 páginas).

*Los que se mueren
solamente se mudan de casa
solamente se van a vivir
al otro Zanatepec
al Zanatepec de arriba
al que por las noches vemos
prender los fogones de sus casas
si miramos al cielo
..contaba el abuelo Vito.-*

*Decía también que el Zanatepec de arriba
es más grande que el Zanatepec de abajo
porque antes mucho antes
de que llegaran extraños a estas tierras
el pueblo era muy grande
tan grande que la gente
se tropezaba en los caminos*

*Pero un día hubo mortandad
un día cuando ya los de afuera
estaban en el pueblo
la gente se caía en las calles
se caía en el monte en los caminos
y se quedaba muerta*

*Por eso -contaba el abuelo- -
en el pueblo de arriba vive más gente
que que el pueblo de abajo*

Y Finalmente, se los dedico a todos aquellos que creen como dice Silvio Rodríguez "...a lo imposible... al sueño que nos lanza", que ha sido la fuente de motivación en mi vida.

ÍNDICE

1. RESUMEN Y ABSTRACT	
2. INTRODUCCIÓN	1
3. ANTECEDENTES	3
4. OBJETIVOS	8
5. MATERIALES Y MÉTODOS	9
5.1 Descripción del área de estudio.....	9
5.2 Diseño experimental.....	11
5.3 Muestreo de suelos de las parcelas agroforestales.....	13
5.4 Análisis de laboratorio.....	13
5.5 Evaluación del cultivo de maíz en la Montaña de Guerrero.....	16
5.6 Experimento de actividad microbiológica a través de la evolución de CO ₂ del suelo bajo el sistema agroforestal.....	17
5.6.1 Muestreo de suelos y material vegetal para el experimento.....	17
5.6.2 Evaluación de la agregación en suelos por el efecto las leguminosas nativas.....	21
5.7 Muestreo de suelos y preparación de las láminas micromorfológicas.....	21
5.8 Dinámica de la formación de agregados.....	22
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
6.1. Características diferenciadoras del suelo.....	24
6.2 Características morfogenéticas.....	24
6.2 Origen, evolución y clasificación de los suelos.....	24
6.3 Características físicas y químicas de los suelos.....	25
6.4 La importancia de la MO y la dinámica de los microorganismos.....	35
6.5 Características de los suelos y su relación con los rendimientos de maíz asociados a leguminosas bajo sistemas agroforestales.....	36
6.6 La actividad microbiológica a través de la evolución del CO ₂ en suelos bajo sistemas agroforestales.....	40
6.7 Evaluación de la agregación en suelos por el efecto de leguminosas nativas.....	44
6.8 Agregados: Macromorfología.....	44
6.9 Micromorfología y mineralogía de los suelos.....	46
6.10. Dinámica de la formación de agregados.....	58
7. CONCLUSIONES	63
8. LITERATURA CITADA	65

1. RESUMEN

EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS AGROFORESTALES CON LEGUMINOSAS NATIVAS EN LA RESTAURACIÓN DEL SUELO EN LA MONTAÑA DE GUERRERO, MÉXICO

Como ocurre en muchas regiones del país, en la Montaña de Guerrero la degradación edáfica es muy severa, de ahí la importancia de aportar propuestas que ayuden a revertir esta problemática.

Por ello, el objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto de un sistema agroforestal, basado en el establecimiento de las leguminosas nativas: *Leucaena esculenta*, *Acacia acatlensis* y *Lysiloma divaricata*, en la restauración y conservación de un suelo seleccionado clasificado como Entisol, que ha sido sometido a las prácticas productivas agrícola y ganadera tradicionales de la región.

Para ello, se determinaron las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo; de estas últimas, se eligió la evolución del Dióxido de Carbono a los 8, 16 y 32 días de incubación de los suelos, adicionados con la hojarasca de estas leguminosas. Además, se realizó la caracterización micromorfológica de los suelos, con el propósito de observar la formación de agregados como un indicador de su restauración. Los resultados mostraron diferencias en cuanto a la resistencia de los agregados del suelo en seco.

Con base al estudio micromorfológico fue también posible evaluar que: (1) en las muestras testigo (suelo No Agroforestal) el desarrollo de los agregados fue débil; (2) en las muestras con *L. esculenta* el desarrollo de los agregados varió de débiles a moderados y (3) en muestras con *L. divaricata* y *A. acatlensis* los agregados mostraron un desarrollo moderado. Además, se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p=0.0155$) en el porcentaje de carbono total de los suelos a los 32 días de incubación. En lo que se refiere a los porcentajes de N en los suelos y la relación C/N, no hubo diferencias significativas ($p=0.194$ y $p=0.856$, respectivamente).

1. ABSTRACT

EVALUATION OF THE EFFECT OF NATIVE TREE LEGUMES UNDER AGROFORESTRY SYSTEMS ON SOIL RESTORATION IN THE MOUNTAIN OF GUERRERO, MEXICO

As in many other regions of Mexico, edaphic degradation in the Mountains of Guerrero is very severe. It is therefore important to formulate proposals that may help to revert these problems.

Therefore the aim of this research was to evaluate the effect of agroforestry systems with the use of native Leguminosae species *Leucaena esculenta*, *Acacia acatlensis* and *Lysiloma divaricate*) in the restoration and conservation of soils (Entisoles) subjected to traditional agriculture and animal husbandry productive practices.

We determined the physical, chemical and biological properties of the soils; of the latter, we selected the carbon dioxide evolution of the soils added with the leaf litter of these species at 8, 16 and 32 days of incubation. The micromorphology of the soils was characterized to observe the formation of aggregates as an indicator of their restoration. The results showed differences regarding the resistance of the aggregates in the dried soils.

Based on the study of the micromorphology we also determined that: (1) In the control samples (No agroforestry) the development of the aggregates was weak, (2) in the samples of *L. esculenta*, the development of the aggregates was weak to moderate, and (3) in the samples of *L. divaricata* and *A. acatlensis* the aggregates showed a moderate development. We also found significant statistical differences ($p=0.0155$) in the percentage of total carbon at 32 days of incubation. For N and the relation C/N there were no significant differences observed between the samples ($p=0.194$ and $p=0.856$, respectively). We conclude that the agroforestry systems have a positive impact on soil restoration.

2. INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas más dañados en el mundo están localizados en las comunidades indígenas tropicales, que han sido alterados por el indiscriminado cambio de uso del suelo que se ha acelerado en las tres últimas décadas (FAO, 1996). En México, una de las manifestaciones del deterioro ambiental son los problemas de degradación edáfica, particularmente la degradación microbiológica y erosión que alcanzan hasta un 85% de la superficie total del país (Gama, 1996). Estas condiciones se encuentran particularmente en áreas tropicales montañosas y tierras secas en el sur de México (Gama, *et al.*, 1996).

Como resultado de la remoción de la vegetación para uso agrícola y ganadero, en algunos casos de manera manual con machete o aplicando el sistema ancestral de la “roza, tumba y quema”, los suelos pierden rápidamente su capacidad productiva, debido al deterioro que significa la pérdida de su estructura y de la capa orgánica superficial por erosión, lo que conduce al agotamiento de los nutrimentos necesarios para el crecimiento de las plantas (Mapa y Gunasena, 1995).

La erosión de los suelos cultivados resulta de la ruptura de los agregados, principalmente debido al deterioro de su estructura; de ahí que una manera de evaluar la susceptibilidad de los suelos agrícolas a la erosión, podría ser a través del conocimiento de la estabilidad de los agregados del suelo (Le Bissonais, 1996). Esta depende en gran medida de la materia orgánica que es proporcionada por la vegetación, al mismo tiempo la vegetación le da protección al suelo contra la erosión, ya que el efecto adverso de la erosión es la pérdida de la estabilidad debido a la remoción de la materia orgánica y de los nutrimentos en los sedimentos erodados.

Los agregados son el resultado de la interacción cohesiva entre las partículas de suelo, la materia orgánica y los microorganismos. La reducción del contenido de la materia orgánica, debido al cambio de uso del suelo, será por tanto un impedimento para el desarrollo microbiano, lo que significará la inestabilidad de los agregados hasta su disgregación completa. La pérdida de la estabilidad física del suelo está directamente relacionada, con la remoción de la materia orgánica y de los nutrimentos que ella aporta. Estas características pueden detectarse en los suelos erodados, extremadamente pobres en materia orgánica y carente de estructura. Por ello, al interpretar la conservación del recurso suelo en un sentido amplio, se incluye el control de la erosión y mantenimiento de la productividad (Young, 1989; Mapa y Gunasena, 1995; Schroth, 1995; Oyedale and Aina, 1998).

La evolución del CO₂ en condiciones de campo, representa la respiración de las raíces de las plantas y la microbiota del suelo, y es un indicador sensible del disturbio del ecosistema, fertilidad del suelo y la descomposición de los residuos vegetales (Paul, *et al.* 1999). La evolución del CO₂ es usada como indicador directo de la tasa de descomposición de la materia orgánica y mineralización de C en el suelo (Makinde and Ayeni, 2013).

Considerando que la materia orgánica es uno de los componentes más importantes del suelo, ya que influye directamente en las propiedades físicas, fisicoquímicas y que constituye el vehículo para el reciclaje natural de nutrimentos como el N y P a través de su mineralización, por lo que el flujo de CO₂ es un indicador de la respiración del suelo y teóricamente representa una medida integrativa de la respiración de las raíces, de la fauna del suelo y de la mineralización de todos los diferentes reservorios de carbono del suelo y la hojarasca (Anderson and Ingram, 1996; Doran *et al.*, 1998).

El CO₂ como anteriormente se indicó, es uno de los principales productos metabólicos de los microorganismos heterotróficos y saprobios, y su evolución en el suelo es frecuentemente usado como una medida de la actividad microbiológica (Waksman and Starkey, 1924). La adición o incorporación de materia orgánica al suelo causa incremento en la producción del CO₂; sin embargo, la tasa y la extensión del cambio depende no únicamente del número y tipos de organismos presentes sino, también, de la naturaleza y la cantidad del carbón oxidable agregado; es decir, la tasa de descomposición y la calidad de la hojarasca también puede ser determinado por los contenidos de nitrógeno, lignina y polifenoles; (Pramer and Schmidt, 1974; Franzlueber, *et al.*, 1998; De Costa *et al.*, 2001). La calidad del residuo es una característica intrínseca del recurso. Además, la evolución del CO₂ es influenciada por las condiciones ambientales como: la temperatura, humedad, aireación y reacción del suelo (Anderson and Ingram, 1996; Franzluebbbers *et al.*, 1998).

La adición de materia orgánica a la capa superficial del suelo, aumenta la porosidad y la capacidad de infiltración del mismo, reduce la erosión y mejora la eficiencia de los ciclos biogeoquímicos que lo proveen de nutrimentos (Nair, *et al.*, 1984). Por otra parte, los árboles fijadores de nitrógeno, a la vez, participan en el restablecimiento de la productividad de los suelos y/o a través de sus raíces que se descomponen liberando nitrógeno aprovechable por las plantas (Nair, 1985). Diferentes estudios indican los patrones de descomposición y liberación de nutrimentos a partir de materiales orgánicos en ecosistemas tropicales (Palm *et al.*, 2001; Lupwayi and Haque, 1998; Byard *et al.*, 1996; Vanlauwe *et al.*, 1997; De costa *et al.*, 2001, Tornquist *et al.*, 1999).

En ese sentido, dentro del tema de la conservación de suelos tropicales de México, queda aún mucho por hacer (Gutiérrez-Castorena, 1988). Una de las principales herramientas para estudiar el grado de deterioro de los suelos es la micromorfología. Su importancia ha hecho que en México se han desarrollado tres principales líneas de investigación al respecto: (1) el uso de la micromorfología propiamente dicha, como una herramienta analítica y cuantitativa para diagnosticar la influencia antropogénica sobre el suelo atendiendo, la caracterización cualitativa y cuantitativa de la estructura del suelo y el uso de los rasgos pedológicos, como indicadores de la eficiencia de su manejo; (2) el análisis micromorfológico y mineralógico de los suelos volcánicos endurecidos (“tepetates”) de diferentes estados del país y de las arcillas amorfas de lagos como el de Texcoco y (3) el análisis fractal de los suelos, a partir de bancos de datos micromorfológicos y mineralógicos multiescalados, para documentar el origen fractal de los suelos de México (génesis), destacando su evaluación bajo diferentes sistemas de manejo (Oleschko, K, 1989; Girón- Ríos *et al.*, 2009).

El estudio micromorfológico de suelos tropicales, puede proporcionar información detallada del papel de la agregación en la fábrica del suelo y su relación con los otros componentes edáficos: macromorfológicos, micromorfológicos y mineralógicos, así como la actividad biológica del suelo. Sin embargo, no existe ningún antecedente acerca de que el estudio micromorfológico del suelo haya sido utilizado para evaluar una estrategia que permita la reversión de la degradación física del suelo, objeto de la presente tesis que se refiere a como, a través del estudio de la micromorfología del suelo, se puede evaluar el efecto del manejo del suelo en la agregación siendo, en este caso, la comparación entre un sistema tradicional de monocultivo y un sistema agroforestal.

En la búsqueda de alternativas que desde un punto de vista ecológico y socioeconómico, se adapten a regiones tropicales, los sistemas agroforestales son una buena opción. Estos sistemas son comúnmente llamados cultivos múltiples o de agricultura multiestratificada, cuya importancia radica en que ofrecen la posibilidad de optimizar el rendimiento total de una área (Maydell, 1991).

Como muchas otras regiones del país, la Montaña de Guerrero no está exenta de esta condición de ahí la importancia de las propuestas que ayuden a revertir las tendencias de la degradación del suelo.

Dentro de los diversos sistemas agroforestales, de componente arbóreo, entre las especies con mayor potencialidad se encuentran las leguminosas, en vista de que mejoran y enriquecen las condiciones del suelo dada su capacidad de fijación simbiótica del nitrógeno. Estas especies pueden proporcionar beneficios adicionales a la población rural (Nair, 1985, Cervantes, 1996). La importancia de estas especies en la restauración y el mantenimiento de la fertilidad del suelo está bien documentado (Nair, *et al.*, 1984; Young, 1987; Tornquist *et al.*, 1999).

Ante esta perspectiva, se hace necesario utilizar estos sistemas como una estrategia que pueden auxiliar a la restauración y, sobre todo, para prevenir el deterioro de aquellas zonas que han sido abiertas al cultivo, haciendo compatible la permanencia de las comunidades humanas con la conservación de los recursos naturales.

3. ANTECEDENTES

Los sistemas agroforestales forman parte de la disciplina llamada agroforestería, en la que se incluyen todos los sistemas y prácticas de uso del suelo, donde plantas leñosas perennes se plantan en la misma unidad de tierra donde se establecen los cultivos agrícolas y/o los animales se pastorean, en combinaciones espaciales o en secuencia temporal. En estos sistemas existe una interacción ecológica y económica importante entre los componentes leñosos y no leñosos. Además, la agroforestería tiene un número de funciones de servicio que son importantes en el manejo del suelo (Torquebiau, 1993).

Diferentes métodos, tradicionales y modernos se han propuesto, para el mantenimiento de la productividad del suelo, de los cuales la agroforestería es uno de ellos.

Muchas de las especies arbóreas y arbustivas que se incorporan en las prácticas agroforestales son leguminosas. Esto es debido a que las leguminosas mejoran y enriquecen las condiciones del suelo, dada su capacidad para fijar el nitrógeno atmosférico por medio de su asociación simbiótica con bacterias del género *Rhizobium* (Martínez-Romero, 2001; Toledo, *et al.*, 2003). La adición de materia orgánica a la capa superficial del suelo y, particularmente la de las leguminosas enriquecida con N, aumenta la porosidad y la capacidad de infiltración del mismo, reduciendo la erosión y mejorando la eficiencia de los ciclos biogeoquímicos que proveen de nutrimentos a las plantas (Nair, 1985).

Los árboles fijadores de nitrógeno, a la vez, participan en el restablecimiento de la productividad de los suelos al enriquecerlos con este elemento por medio de la hojarasca que incorporan al y/o a través de sus raíces que se descomponen liberando nitrógeno al suelo (Nair, 1985). Las Acacias y las Leucaenas por ejemplo, tienen un gran éxito en la producción de forrajes así como también en la regeneración de suelos en regiones tropicales (Dommergues, *et al.*, 1983; Garcia *et al.*, 2009). En África, evaluaron la fertilidad del suelo bajo un sistema agroforestal con leguminosas como *Leucaena leucocephala* y *Gliricidia sepium* y en un sistema de producción sin leguminosa se ha encontrado que la concentración de nitrógeno en el suelo y en las plantas fue significativamente más alta (Cobbina, *et al.*, 1989).

En México, *Leucaena esculenta* se ha estudiado en cultivos comerciales bajo un sistema agroforestal (Nair, 1984). Se ha encontrado que esta especie es buena productora de forraje y protectora del suelo, y que además resiste bien el manejo (Cruz, 1989).

Existen muchos trabajos en los que se evalúan los sistemas agroforestales con otras leguminosas, aunque sin hacerlo de manera cuantitativa; sin embargo, para las especies propuestas en este proyecto es evidente la ausencia de investigaciones quizá debido, entre otras cosas, a que son leguminosas nativas de las que se desconoce su potencialidad además de que no están documentadas ampliamente las técnicas de propagación y la utilidad de estas especies. Por lo anterior, no se dispone de datos precisos de la contribución a la fertilidad de los suelos de las especies propuestas en este proyecto.

La información para cada una de las especies es de manera diferencial desde la perspectiva del cultivo. Para la *Leucaena*, a nivel genérico, es muy abundante la literatura tanto internacional (Dijman, 1950; Beuge, 1977; Flores y Stobbs, 1978; Gray, 1968, N:A.S., 1975, 1977 y 1979; Ruiz y Febles, 1987) como nacional (Sánchez y Pérez, 1977; Zárate y Sousa, 1978; Pérez, 1979; Banco de México, 1980; Casas, 1992; Casas y Caballero, 1996). No obstante, la mayor parte de la literatura se refiere a especies diferentes de *Leucaena esculenta* usadas como productores de forraje; concretamente se refieren a *L. leucocephala* y *L. glauca*.

Por otro lado se han realizado investigaciones acerca de la simbiosis de micorriza versículo arbuscular en *Leucaena leucocephala*. Sorensson y Brewbaker (1987) realizaron estudios de fitomejoramiento con varias especies de *Leucaena* incluyendo a *L. esculenta*.

Se ha sugerido que las leguminosas son las especies más promisorias para ser empleadas en la restauración, debido a su gran distribución dentro de la zona de estudio y a la utilidad ecológica y productiva que tienen. Dentro del estrato arbustivo y arbóreo, destacan los géneros *Acacia*, *Mimosa*, *Havardia*, *Leucaena*, *Lysiloma* y *Prosopis* (Cervantes, 1996).

Leucaena esculenta (guaje colorado) es una especie arbórea característica de la vegetación primaria de selva baja caducifolia, encontrándose también en vegetación secundaria. Su distribución es en climas cálidos y semicálidos, aunque también tiene una distribución limitada en climas semitemplados. Se distribuye desde el nivel del mar hasta los 1900 metros. La litología de los ámbitos donde se puede encontrar va de calizas (principalmente yesos) a lutitas, tobas y brecha volcánica. Esta especie se utiliza para forraje y alimentación humana; su mejor época de colecta es en febrero, las hojas se disponen de mayo a diciembre.

L. esculenta es una especie decidua; la caída de las hojas inicia en noviembre (época seca) y termina en marzo y el renuevo foliar comienza en mayo con el inicio de las lluvias, prolongándose hasta septiembre y, para el mes de junio, cuenta con más del 50% en hojas maduras (Arriaga, 1991; Arriaga, *et al.*, 1994).

Se han realizado trabajos sobre los aspectos de la germinación con las especies de *L. esculenta*, *Lysiloma divaricata* y algunas especies de Acacias en la Montaña de Guerrero (Cervantes *et al.*, 1996; Cervantes, 1996a y 1996b).

Lysiloma divaricata (tlahuitole) es una especie arbórea de la Montaña de Guerrero, que se encuentra en vegetación de selva baja caducifolia. Es posible encontrarla también en vegetación secundaria; los tipos de clima en los que predomina son los cálidos y semicálidos; las altitudes en

donde se localiza va de los 800 a 1900 m.s.n.m., los sitios donde se pueden encontrar corresponde a una litología donde predominan las tobos y brechas volcánicas, yesos, calizas y lutitas (Arriaga *et al.*, 1994). Su uso en esta región es para ser usada como leña. La disponibilidad de hojas es de mayo a noviembre y la mejor época de colecta es en diciembre. Se ha documentado que la especie es decidua y la caída de las hojas se da de octubre a noviembre (época seca) prolongándose hasta marzo; los renuevos foliares surgen en las primeras lluvias y para junio es cuando se da el máximo desarrollo foliar que se prolonga durante la temporada de lluvias (Arriaga, 1991).

Acacia acatlensis (yupaquelite), en la Montaña de Guerrero las flores se utilizan en la alimentación humana y se venden en los mercados locales, ocasionalmente la madera la utilizan como leña, además de ser una especie cultivada en los huertos familiares de la zona cálida de esta Región (Cervantes, *et al.*, 2001).

Esta especie es un árbol de 4 a 6 metros de alto y se distribuye en los estados de Guerrero, Jalisco, Michoacán, Morelos, Oaxaca, Puebla y Guanajuato, en áreas con selva baja caducifolia y se establece en altitudes que varían de los 45 a los 1,200 metros sobre el nivel del mar, sobre laderas y planicies, en climas cálido y semicálido, los suelos donde se establece presentan texturas franco arcillosas y arcillo arenosas, con un pH de neutros a ligeramente alcalinos (Cervantes, *et al.*, 1998, Cervantes, 2005).

A. acatlensis es una especie decidua, la senescencia de las hojas se presenta en los meses de diciembre a abril. La floración se extiende desde finales de marzo hasta principios de junio, aunque la mayor producción se encuentra entre abril y mayo, los frutos pueden colectarse desde principios de diciembre. Se han realizado estudios sobre su manejo en vivero (Cervantes, *et al.*, 2001).

La erosión de los suelos se acentúa más en los suelos cultivados debido a que en ellos se ha eliminado la vegetación original del edafosistema. La ruptura de los agregados del suelo es uno de los elementos que nos permite detectar el proceso de erosión de tal manera que, para evaluar la susceptibilidad de un suelo a la erosión, requiere determinarse el grado de la estabilidad de los agregados. Son los agregados los que conforman la estructura del suelo, y su estabilidad depende de la calidad agregante de la materia orgánica y su resistencia a la degradación (Le Bissonais, 1996).

La pérdida de la estabilidad del suelo ocurre debido a la remoción de la materia orgánica y de los nutrientes en los sedimentos erodados; como resultado de la actividad antrópica realizada durante su introducción al cultivo (Young, 1989). Por tanto, la degradación biológica del suelo se evalúa a través pérdida de la materia orgánica, estimada en t/ha/año cuando, después de la tala o la roza, tumba y quema, se pierde la fuente natural de la materia orgánica, que es la cubierta vegetal original del suelo. Este fenómeno ocurre con mayor velocidad en los climas tropicales donde la temperatura media anual es alta, facilita la oxidación de la materia orgánica y, debido a ello, su pérdida en el suelo. Al interpretar el significado de la conservación del recurso suelo, en un sentido amplio, debe incluirse el control de la erosión y mantenimiento de la productividad, a través de la incorporación de la materia orgánica y de su calidad ya que ello garantiza su permanencia en el suelo (Palacios y Gama, 1994).

En la agricultura sustentable, el papel de la materia orgánica es determinante para la conservación de los suelos. Las propiedades estructurales de los suelos en los trópicos son profundamente influenciados por el contenido de la MO y por la actividad biótica del suelo; de tal forma, que las

prácticas de manejo afectan la estructura del suelo (Stevenson, 1994). Además, la materia orgánica tiene un efecto directo sobre la disponibilidad de los nutrientes para el crecimiento de las plantas, sirviendo como fuente de N, P y S, entre otros nutrientes, a través de la mineralización que realizan los microorganismos del suelo.

La MO, particularmente la hojarasca y la fracción ligera, son una fuente de energía para los organismos del suelo. Las funciones de estos son múltiples. Algunos contribuyen al desarrollo de una buena estructura del suelo (como son las lombrices de tierra), y ello contribuye a aumentar la aereación y drenaje de los suelos (Stevenson, 1994).

Los estudios con especies nativas en los aspectos mencionados son pocos y en ocasiones existen especies como *Acacia farnesiana* que es muy estudiada, mientras hay otras Acacias poco conocidas como *A. acatensis*, *A. cochliacanta* y *A. bilimekii* quienes están en peligro en algunas regiones de México, debido a la sobreexplotación o deforestación (Toledo *et al.*, 2003). Con estas especies se perderían otros organismos, recientemente sobre *A. acatensis* se aisló una nueva especie de bacteria simbiote que es *Sinorhizobium americanus* (Toledo *et al.*, 2003), ya que la aportación de N por parte de algunas leguminosas es debido a bacterias simbiotes que son fijadoras de N.

Para el caso de la Montaña de Guerrero, se han realizado estudios sobre *L. esculenta*, *L. divaricata* y varias especies de Acacias. Un estudio caracterizó la rizósfera y analizó la micorrización. *L. esculenta* presentó 40.11% de micorrización, mientras que *L. divaricata* sólo 29.91 %. Las esporas identificadas como *Glomus 1* y *Glomus 7* corresponden a la primera especie, mientras que *Glomus 9* y *Glomus 11* a la segunda. De estas esporas, *Glomus 1* y *Glomus 9* se asociaban a nueve especies de leguminosas importantes para el establecimiento de sistemas agroforestales (Rendón, 1995). Este mismo autor resalta que las esporas aisladas podrían ser las más resistentes a las condiciones de deterioro de la región y justamente pueden ser las ideales para fines de rehabilitación y restauración de suelos en esta zona (Micorriza Vesículo-arboscular MV-A).

La evolución de CO₂ por medio de incubaciones en laboratorio, efectivamente indican la presencia de biomasa microbiana y sus enzimas en el suelo, y las reservas de carbono orgánico del suelo (Paul *et al.*, 1999, Haney *et al.*, 2008). Así también, esto permite separar la respiración microbiana de la respiración de las raíces cuando se mide en campo, ya que las raíces representan una parte muy importante de la respiración del suelo. Maier and Kress (2000) encontraron en una plantación de pino, que las raíces fueron responsables del 50 al 73% de la evolución de CO₂ del suelo. La evolución de CO₂ es también usada como indicador directo de la tasa de descomposición de la materia orgánica y mineralización de C en el suelo (Makinde and Ayeni, 2013).

Con estos antecedentes y dada la importancia que tiene la actividad microbiológica del suelo para la restauración del mismo, se eligió para este estudio la comunidad de San Nicolás Zoyatlán en la Montaña de Guerrero, donde los problemas debido a la degradación biológica del suelo son muy evidentes. Con estudios previos en esta comunidad se inició la restauración ambiental de acuerdo a cada situación y tipo de deterioro y en base en lo anterior Cervantes (1996) consideró agrupar las prácticas productivas en función del impacto que producen sobre la vegetación, en: (1) prácticas productivas, que no implican la remoción total de la vegetación, como es el caso de la extracción de leña y la recolección de productos forestales y (2) aquellas que implican la remoción total de la cubierta, como son las prácticas agrícolas y pecuarias.

Partiendo de lo anterior, la prevención y rehabilitación se inició a través de la introducción de especies útiles de leguminosas en parcelas abandonadas y que estaban en uso.

Esta tesis está inmersa en este último rubro, ya que se analizan las acciones de restauración que eran tendientes a contribuir en el mantenimiento de la capacidad productiva del suelo en terrenos que se encontraban en uso, por medio del establecimiento de sistemas agroforestales. Se efectuó en el marco de un proyecto de investigación-desarrollo de “Restauración ambiental con especies nativas para el uso sustentable de los recursos forestales“, financiado por el Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza. Dicho proyecto promovió la rehabilitación o restauración de los ambientes deteriorados debido a las prácticas productivas en comunidades campesinas de infra-subsistencia, a través de la utilización de especies nativas útiles con diferentes formas de vida, que fueron introducidas en sistemas agroforestales (como una estrategia preventiva) o en sitios que requirieron ser atendidos para lograr su reincorporación productiva, bajo estos antecedentes a continuación se describen los objetivos.

4. OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo fue evaluar el efecto de un sistema agroforestal de tres leguminosas nativas de las especies: *Leucaena esculenta*, *Acacia acatlensis* y *Lysiloma divaricata*, en la restauración y conservación de un suelo clasificado como Entisol que fue sometido a prácticas productivas tradicionales de la región de la Montaña de Guerrero, como son la agricultura y ganadería.

Los objetivos particulares fueron:

- Evaluar las características de los suelos de las franjas agroforestales establecidas en el diseño experimental.
- Conocer la adición de nutrimentos al suelo bajo el sistema agroforestal elegido antes mencionado.
- Determinar la actividad microbiológica del suelo bajo el sistema agroforestal elegido (integrado por *Leucaena. esculenta*, *Lysiloma divaricata* y *Acacia acatlensis*) a través de la evolución de CO₂.
- Evaluar la agregación en los suelos por el efecto de las leguminosas utilizadas en las franjas agroforestales
- Comparar los rendimientos de maíz en franjas con y sin sistema agroforestal.

5. Materiales y Métodos

5.1 Descripción del área de estudio

El estudio fue realizado en la comunidad de San Nicolás Zoyatlán que pertenece al municipio de Xalpatláhuac en la región de la Montaña de Guerrero. Es una comunidad náhuatl que se encuentra al sureste de la ciudad de Tlapa. San Nicolás Zoyatlán se localiza a los 17° 27' 30" de latitud Norte y a los 98° 38' 30" de longitud Oeste. Colinda al norte con la comunidad de Tlalquiltzingo, al este con la cabecera municipal Xalpatláhuac, al Sur con Ocatepec, al Sureste con Ocatequila, al Oeste con Copanatoyac y al Noroeste con Oztocingo (Figuras 1a, 1b y 1c). La comunidad tiene una extensión de 785 hectáreas y las altitudes varían desde 1300 hasta 1750 m.s.n.m. La litología que predomina en la comunidad está constituida por andesitas, brechas volcánicas, tobas, aluvión, conglomerados de areniscas, brecha cuarcítica, calizas y lutitas-areniscas (Cervantes, *et al* 2005). El clima que se presenta de acuerdo con la clasificación de Köppen modificado por García (1988) es de tipo A(C) w1 que es el semicálido subhúmedo, intermedio por su grado de humedad. La temperatura promedio anual es 27.5 °C. La precipitación promedio anual es de 731 mm concentrada entre los meses mayo y septiembre. En estas áreas las altitudes van desde 1300-1700 y con pendientes de 1 a 75%. La vegetación dominante es de selva baja caducifolia El principal impacto de la deforestación ocurrió aproximadamente hace 100 años y la vegetación actual consiste de vegetación secundaria de pastos con árboles remanentes de vegetación primaria.

De acuerdo con Cervantes, *et al.*, 2005, en la zona los suelos predominantes están representados por Leptosoles mollicos y Regosoles antrópicos.

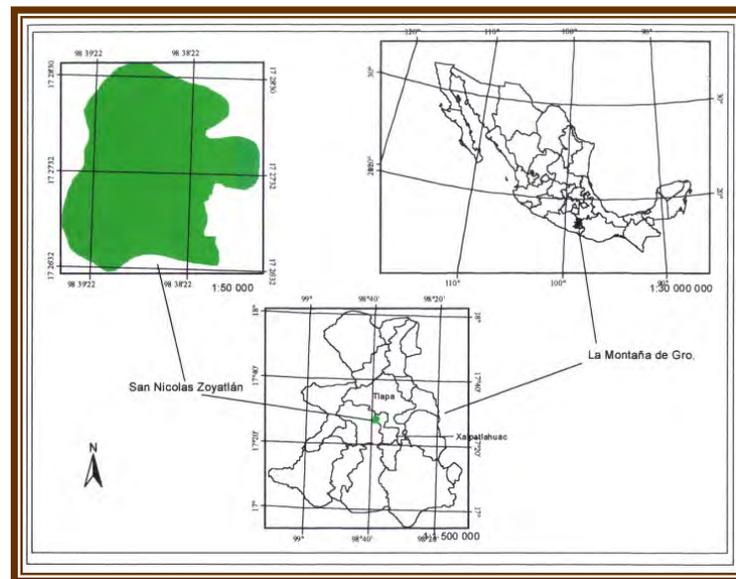


Figura 1a: Ubicación de la Montaña de Guerrero, Municipio de San Nicolás Zoyatlán.

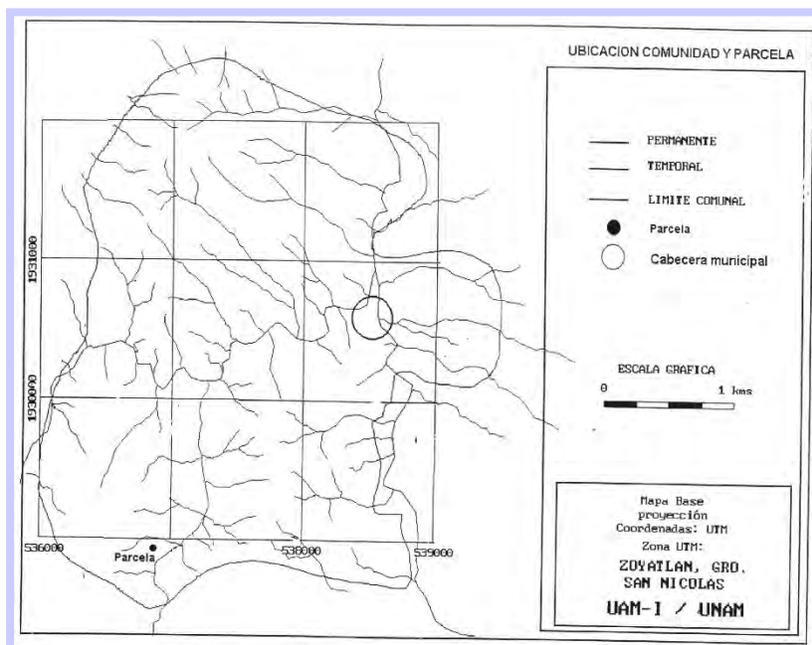


Figura 1b: Ubicación de la comunidad y la parcela experimental.

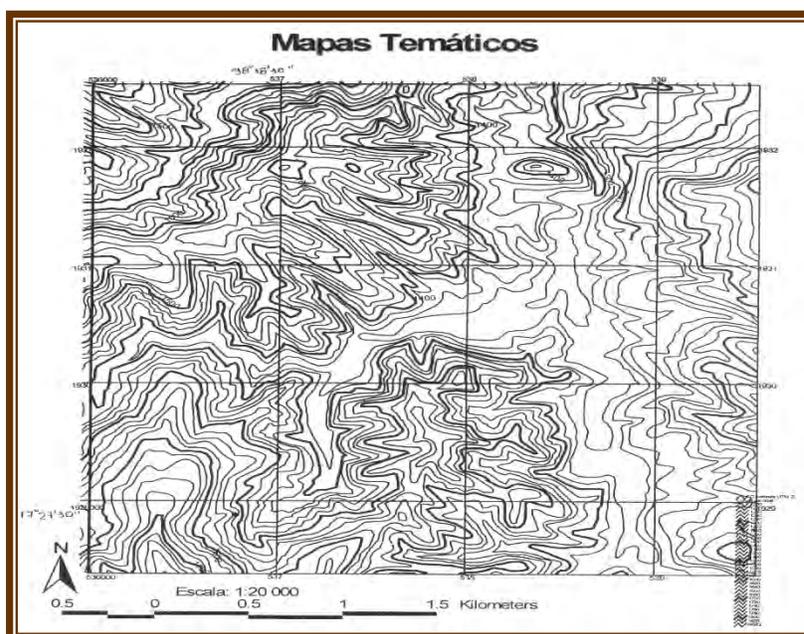


Figura 1c: Mapa temático (topografía) de la ubicación de la parcela experimental.

5. 2. Diseño experimental

El diseño de estos sistemas agroforestales partió de la premisa de que, con ello, se evitaría el impacto negativo de la actividad agropecuaria sobre los terrenos, disminuyendo la erosión del suelo mediante el establecimiento de la cobertura vegetal, su desarrollo radical, y el aumento de su estabilidad estructural y productividad debido, en gran parte, a la asociación de bacterias fijadoras de nitrógeno con la mayoría de las especies leguminosas, y a su aporte de hojarasca al suelo.

La selección de las especies de leguminosas para el sistema agroforestal se hizo con base en las afinidades ambientales de las especies, eligiendo las más adecuadas para cada condición, así como a la preferencia de los productores y a los beneficios que puedan aportar ya sea leña, frutos y forraje. Además, se consideró la cantidad de tierra disponible para probar estas prácticas. Para la distribución de los sistemas agroforestales se consideró su establecimiento en cercas vivas, con especie de porte arbóreo y arbustivas, en el perímetro del terreno y en el interior del mismo con base en las curvas a nivel en hileras monoespecíficas.

El diseño experimental está integrado por cuatro tratamientos con 4 pseudorepeticiones cada uno. Los tratamientos corresponden a 3 sistemas agroforestales constituidos cada uno por las siguientes leguminosas (Figura 2):

1. *Leucaena esculenta*
2. *Acacia acatensis*
3. *Lysiloma divaricata*.
4. Control (No Agroforestal).

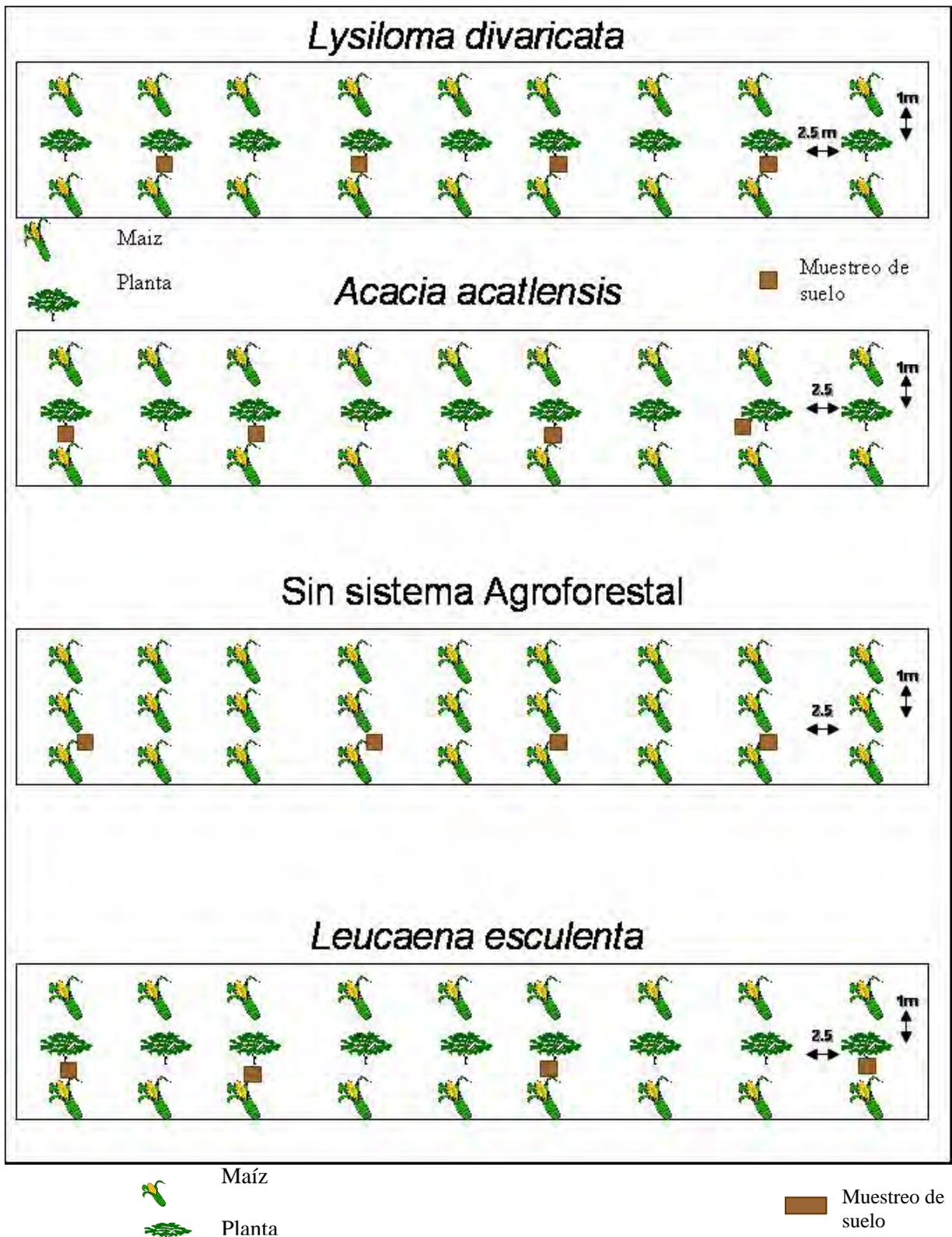


Figura 2. Diseño de los sistemas agroforestales por franjas por especie y el muestreo de suelos.

Previo a los muestreos de suelo la parcela experimental se caracterizó ambientalmente (Tabla 1) con criterios visuales establecidos en campo incluyendo los siguientes aspectos: la ubicación se marcó en un mapa topográfico escala 1:50,000 (INEGI) como muestra la Figura 1c; la litología; la pendiente (es un promedio de las pendientes obtenidas en cada franja); la altitud; orientación; profundidad del suelo; pedregosidad; rocosidad; erosión del suelo y la unidad de terreno con base en la morfología (Van Zuidam,1985; Tricart y Killiam,1982); se tomaron muestras de suelos representativas de sistemas no agroforestal las cuales fungieron como testigo. En la Figura 2, se presenta la distribución espacial de las muestras obtenidas.

Tabla 1. Caracterización ambiental de la parcela experimental.

FICHA PARA LLENAR DENTRO DE LA PARCELA									
UBICACION	LITOLOGIA	PENDIENTE PROMEDIO EN %	ALTITUD M.S.N.M	ORIENTACIÓN	PROFUNDIDAD DEL SUELO CENTIMETROS	PEDREGOSIDAD %	ROCOSIDAD %	EROSION DEL SUELO TIPO INTENSIDAD	UNIDAD DE TERRENO MORFOLOGIA
	transición entre cuarcíticas y tobas	43.75	1500 en promedio	Este-sureste	menos de 30 cm	70-80	menos del 5	Hídrico	Ladera fuerte

En cada franja se realizó lo siguiente:

Para las características morfológicas de los perfiles, estos se describieron en campo y fue hecha con base en el Manual 18 del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, 1993).

5.3 Muestreo de suelos de las parcelas agroforestales

Estos muestreos se realizaron para la caracterización desde el punto de vista: morfológico, físico, químico y fisicoquímico y se basó en los métodos propuestos por el Soil Survey Laboratory Methods and Procedures for Collecting Samples (1996) y en el Field Book for Describing and Samples Soil (1998). Los suelos se colectaron en cada franja del diseño experimental en dos épocas del año: la primera época corresponde al mes de abril de 1998 (en la época seca) y la segunda en noviembre del mismo año, correspondiente a la época de lluvias. En total fueron colectadas, durante ambas épocas, 32 muestras representativas, correspondientes a la profundidad de 0-30 cm que incluyó únicamente el horizonte Ap. El muestreo se realizó de modo aleatorio (Aguilera, *et al* (1986) colectando las muestras de suelos que sostenían el crecimiento de las plantas nativas elegidas para el experimento (*Leucaena esculenta*, *Acacia acatlensis* y *Lysiloma divaricata*), como se muestra en la Figura 2.

5.4. Análisis de laboratorio

Para los análisis físicos y químicos, los suelos secados al aire y tamizados a través de un tamiz de 2 mm (USDA, 1993). Las muestras de suelo fueron analizadas por triplicado y los resultados comparados con estándares. Esta fase metodológica estuvo constituida por las siguientes etapas.

Etapa 1: Procesamiento de las muestras

El procedimiento utilizado fue el delineado por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (SCS-USDA, 1998). Las muestras fueron secadas al aire y tamizadas a través de una malla de 2 mm. Posteriormente se guardaron en bolsas de polietileno mantenidas a 20 °C.

Etapa 2: Análisis de las características morfológicas y físicas de los suelos, que incluyó las siguientes determinaciones:

A. Color

Las pruebas se hicieron en húmedo y en seco utilizando, por comparación, las tablas de color de Munsell (1992).

B. Textura

El análisis del tamaño de partícula (textura del suelo) se determinó por la técnica hidrométrica de Bouyoucos (1963) ampliamente recomendada por SCS USDA, 1996. La clasificación textural se obtuvo utilizando el triángulo de texturas propuesto por USDA (1996).

C. Densidad aparente

La densidad aparente se realizó con base a los métodos de laboratorio propuestos por SCS- USDA (1996). Para ello las muestras fueron secadas a 95°C hasta peso constante.

D. Densidad de partícula

Fue estimada de acuerdo a los procedimientos delineados por SCS (1996), utilizando el método del picnómetro.

E. Porosidad

Se calculó de acuerdo a la fórmula propuesta por USDA (1993), basada en los valores de la densidad aparente y densidad de partícula:

$$\% \text{ Porosidad} = \left[\frac{1 - D_a}{D_r} \right] 100$$

F. Relación Limo/ Arcilla.

Esta relación, ampliamente recomendada por el Soil Taxonomy (1990). Consistió en dividir los porcentajes de limo obtenidos en la textura sobre los porcentajes de arcilla. Los valores más bajos que se obtienen, teóricamente indican un mayor desarrollo del suelo.

Etapa 3: Características químicas y fisicoquímicas

A. pH (H₂O, 1:2.5 y KCl 1:2.5)

Para su determinación se procedió de acuerdo al lineamiento establecido por SCS-USDA (1996).

B. Capacidad de Intercambio Catiónico Total (CICT)

Se realizó de acuerdo con el método de titulación con versenato 0.02 N y de CaCl₂ 1 N con pH 7 (Jackson, 1965).

C. Análisis cuantitativo de Ca⁺⁺ y Mg⁺⁺ intercambiables

Se determinaron mediante el Método Volumétrico del versenato (0.02 N) Jackson (1965).

D. Análisis cuantitativo de Na⁺ y K⁺ intercambiables

Mediante el método de Flamometría obteniéndose la alícuota por el lavado del suelo con acetato de amonio 1N a pH 7 (Jackson, 1965).

E. Porcentaje de saturación de bases (SB)

Se obtuvo a partir de la suma de los cationes Ca⁺⁺, Na⁺, Mg⁺⁺ y K⁺ y considerando la Capacidad de Intercambio Catiónico Total como el 100%.

F. Porcentaje de materia orgánica (MO)

Se realizó mediante la técnica modificada por Walkley y Black (1957).

G. Nitrógeno Total (NT)

Por digestión de las muestras en H₂SO₄, y su destilado en ácido bórico. Titulando con H₂SO₄ 0.1M (Método Kjeldahl, Jackson, 1982).

H. Fósforo Total (PT)

Fue extraído mediante HCl 0.025M y 0.03 M NH₄F y determinado por colorimetría a 660 mμ (Jackson, 1982).

I. Interpretación de los datos

Se realizó de acuerdo a USDA (2003). También se realizaron los análisis de varianza con el paquete estadístico de Statgraphics de cada una de las variables del suelo.

5.5 Evaluación del cultivo de maíz en la Montaña de Guerrero

Se evaluaron los rendimientos de maíz en franjas con y sin sistemas agroforestales. Estos rendimientos se evaluaron de acuerdo a lo propuesto por Hernández (1996), como se muestra en la tabla 2. En cada franja agroforestal y no agroforestal, se muestrearon 10 sitios al azar en el surco anterior y posterior a la planta (Figura 2) y se tomaron una submuestra de 3 mazorcas para obtener el peso seco por la técnica del peso constante. El estadístico que aplicó a los rendimientos es un análisis de varianza por una vía.

Tabla 2. Datos que se tomaron dentro del sitio de muestreo para la evaluación de los rendimientos (formato).

Tabla para llenar dentro del sitio

Número Mazorcas	Mazorcas dañadas	Molcates*	Peso en campo	Peso seco

Nombre del entrevistado:

Fecha:

Comunidad

Observaciones: *Molcates son las mazorcas pequeñas

Para obtener los datos de peso seco del grano se tomaron submuestras de cinco mazorcas en cada cuadro (CYMMYT-UACH, 1986, citado por Hernandez, 1996). Se obtuvo el peso de las mazorcas con hojas, sin hojas y el peso del olote. También se obtuvo el peso del grano húmedo. Para el peso seco del grano se aplicó la técnica del peso constante (González, 1984).

Los rendimientos por hectárea se obtuvieron de acuerdo a la siguiente fórmula:

$\text{Rendimiento Ha}^{-1} : 100 (P.C)(\text{Factor}) (P.S.)$

Donde:

100 = Factor de conversión para expresar los resultados por hectárea.

P.C = Suma del peso en campo de las mazorcas buenas, dañadas y molcates (mazorcas pequeñas).

Factor = Es el promedio del peso del olote de las 30 submuestras

P.S = Peso seco en 100 gramos.

Para los análisis estadísticos de la variabilidad de los rendimientos se realizó un análisis de varianza con un criterio de clasificación. Este análisis se efectuó con el uso del programa Statgraphics ver. 1.3. En el caso de las gráficas de rendimientos los valores de los resultados obtenidos fueron normalizados.

Las variables independientes fueron las parcelas y la variedad sembrada; para las variables respuestas: matas por hectárea, plantas por matas, mazorcas por matas, número de mazorcas buenas, número de mazorcas dañadas, peso de las mazorcas dañadas, número de mazorcas molcates, peso de las mazorcas molcates y rendimientos. Algunas de estas variables correspondieron a los datos originales y en otras son los datos transformados; dichas transformaciones fueron porcentaje,

arcoseno, log₁₀, raíz cuadrada de la variable. Se utilizó la Prueba de Bartlett para analizar la homogeneidad de varianzas. Cuando las varianzas resultaron heterogéneas ($p < 0.05$) se procedió a realizar la transformación adecuada con el propósito de lograr homocedasticidad. Después de analizar los rendimientos con un análisis de varianza, se procedió a realizar un análisis de regresión entre todas las variables medidas con el propósito de conocer las variables que estaban determinando los rendimientos.

5.6. Experimento de la actividad microbiológica a través de la evolución de CO₂ del suelo bajo el sistema agroforestal

5.6.1 Muestreo de suelos del material vegetal para el experimento

El muestreo de suelos se basó en los métodos propuestos por el Soil Survey Laboratory Methods and Procedures for Collecting Samples (1996) y en el Field Book for Describing and Samples Soil (1998), dicho muestreo se realizó exactamente en las franjas agroforestales de cada una de las leguminosas (*Acacia acatlensis*, *Lysiloma divaricata* y *Leucaena esculenta*, que fueron establecidas en 1996) a una profundidad de 0-20 cm, eliminando la capa de hojarasca en el mes de junio de 1999 al inicio de las lluvias. Los suelos para esta determinación fueron refrigerados a 5 °C hasta su utilización.

Se colectó el material vegetal de cada una de las especies, se secaron al aire libre y se separaron las ramas y las hojas. La cantidad de hojas agregadas al suelo fue en las proporciones de 3000 kg ha⁻¹ como se observa en la tabla 4; debido al tamaño de partícula de la hojarasca de las especies utilizadas y a la observación en campo de su incorporación rápida al suelo, no fue necesario molerla ya que pasó a través de la malla de 5mm. Además, se realizó el análisis de la composición química de las hojas en cuanto al contenido de N y C de cada una de las especies utilizadas en el experimento. Dichas determinaciones se realizó con las técnicas Microkjeldhal y Walkley y Black.

El Diseño experimental de Evolución de CO₂ fue aleatorio se incubaron los suelos (con la adición de hojas secas de cada una de las especies), se midió la actividad microbiológica del suelo a través de la evolución de CO₂ a los 8, 16 y 32 días de incubación. El método es con modificaciones a la propuesta por Anderson (1996), UNESCO-UIBS (1989); Pramer y Schmidt (1974). A continuación de manera detallada y se desarrollan ampliamente las distintas etapas del experimento de evolución de CO₂, la planeación del experimento fue del 6 al 28 de junio y período del experimento fue del 29 de junio al 31 de julio de 1999. Dicho diseño fue programado un diseño experimental completamente al azar de dos factores (Especies y tiempos) con cuatro niveles las especies y tres niveles de tiempos (8, 16 y 32 días). Cada nivel con cuatro repeticiones. En este experimento se consideró una variable (evolución de CO₂). En la tabla 3 ilustra esquemáticamente la distribución de las variables y tratamientos. El diseño experimental utilizado está conformado por 195 unidades, dicho diseño es completamente al azar con dos factores (Especies y tiempos) con cuatro niveles que son las especies y tres tiempos (8, 16 y 32 días). Cada nivel con cuatro repeticiones. De las 195 unidades 192 corresponden a las muestras de suelo y tres pertenecen a blancos que no contenían suelos. Los tratamientos empleados, tanto en los suelos seleccionados como en el testigo, se describen a continuación:

1. Suelo seleccionado al que se le adicionó hojarasca de *L. esculenta*.
2. Suelo seleccionado al que se le adicionó hojarasca de *A. acatlensis*.
3. Suelo seleccionado al que se le adicionó hojarasca de *L. divaricata*.
4. Suelo seleccionado sin adición de hojarasca (No Agroforestal)

El suelo que no recibió ningún tipo de hojarasca se considera como testigo (No Agroforestal).

Tabla 3. Unidades experimentales: distribución de las variables y tratamientos

TRATAMIENTO	MUESTRA	TIEMPO											
		8 DIAS				16 DIAS				32 DIAS			
<i>L. esculenta</i>	M1	1	18	35	52	69	86	102	118	134	150	166	182
	M2	2	19	36	53	70	87	103	119	135	151	167	183
	M3	3	20	37	54	71	88	104	120	136	152	168	184
	M4	4	21	38	55	72	89	105	121	137	153	169	185
<i>Acacia acatlensis</i>	M1	5	22	39	56	73	90	106	122	138	154	170	186
	M2	6	23	40	57	74	91	107	123	139	155	171	187
	M3	7	24	41	58	75	92	108	124	140	156	172	188
	M4	8	25	42	59	76	93	109	125	141	157	173	189
<i>Lysiloma divaricata</i>	M1	9	26	43	60	77	94	110	136	142	158	174	190
	M2	10	27	44	61	78	95	111	127	143	159	175	191
	M3	11	28	45	62	79	96	112	128	144	160	176	192
	M4	12	29	46	63	80	97	113	129	145	161	177	193
No Agroforestal	M1	13	30	47	64	81	98	114	130	146	162	178	194
	M2	14	31	48	65	82	99	115	131	147	163	179	195
	M3	15	32	49	66	83	100	116	132	148	164	180	196
	M4	16	33	50	67	84	101	117	133	149	165	181	197
Blanco	Blanco	17				34				51			

En la preparación del suelo seleccionado y cumplir con la premisa de que se controlaran ciertas condiciones de igualdad en los suelos, así como las condiciones físicas del suelo en un determinado volumen experimental, se analizaron las características físicas del suelo (humedad, densidad aparente y capacidad de campo) el suelo se secó en un horno a 60 °C por dos días, y se tamizó a través de una malla de 5mm, de tal forma que permitiera calcular las relaciones masa / volumen en el espacio experimental (Tabla 4).

Posteriormente, para la incubación de los suelos experimentales correspondiente a las franjas agroforestales y testigo (blanco) con un peso de 760 gramos, fue físicamente homogeneizado (“cuarteado”) y dividido en 12 porciones iguales para cada una de las muestras. En todos los casos, la proporción fue de 50 g de suelo para la incubación; sin embargo, la cantidad de suelo para cada recipiente variaban desde 56.67 gramos hasta 63.92 gramos dependiendo de la humedad natural que cada muestra contenía. Únicamente se utilizó suelo con un tamaño de partícula ≤ 2.0 mm de diámetro. (Tabla 4).

Tabla 4. Análisis y preparación del suelo antes del experimento de evolución de CO₂

		% Humedad	Suelo agregado a 50 Gramos	Suelo por muestra Gramos	DA	Gramos de Hoja/Suelo	Ton de suelo/Ha de acuerdo a la Densidad aparente (DA)	Capacidad de Campo 60%
<i>Leucaena esculenta</i>	M1	17.24	8.62	58.62	1.24	0.071	2,480	9.82
	M2	17.39	8.70	58.70	1.22	0.072	2,440	9.82
	M3	20.48	10.24	60.24	1.16	0.078	2,320	9.82
	M4	23.44	11.72	61.72	1.15	0.081	2,300	9.82
<i>Acacia acatlensis</i>	M1	19.05	9.52	59.52	1.14	0.078	2,280	9.11
	M2	22.89	11.45	61.45	1.07	0.086	2,140	9.11
	M3	13.33	6.67	56.67	1.1	0.077	2,200	9.11
	M4	17.65	8.82	58.82	1.04	0.085	2,080	9.11
<i>Lysiloma divaricata</i>	M1	27.85	13.92	63.92	1.07	0.090	2,140	11.06
	M2	18.60	9.30	59.30	1.18	0.075	2,360	11.06
	M3	18.18	9.09	59.09	1.16	0.076	2,320	11.06
	M4	23.81	11.90	61.90	1.17	0.079	2,340	11.06
No Agrofore stal	M1	18.60	9.30	59.30	1.18	0.075	2,360	9.3
	M2	20.00	10.00	60.00	1.12	0.080	2,240	10
	M3	21.95	10.98	60.98	1.15	0.080	2,300	10.98
	M4	20.24	10.12	60.12	1.08	0.083	2,160	10.12

Finalmente, el experimento se estableció contando con cada una de las 192 porciones que fueron colocadas en los recipientes de plásticos respectivos, esto es una proporción de 50 g de suelo por recipiente. Se crearon 195 unidades experimentales contando tres recipientes testigos o blancos también distribuidos aleatoriamente en el diseño experimental, como se observa en la tabla 5.

Tabla 5. Distribución de las unidades experimentales en el cuarto de incubación.

TRATAMIENTOS	MUESTRAS	TIEMPO											
		8 DIAS				16 DIAS				32 DIAS			
<i>Leucaena esculenta</i>	M1	5	3	28	34	72	13	12	18	93	18	16	14
	M2	8	7	46	16	81	86	10	18	16	90	10	15
	M3	31	1	38	21	74	16	11	17	19	10	10	19
	M4	4	5	20	17	65	15	98		18	10	12	16
<i>Acacia acatlensis</i>	M1	52	3	49	6	73	15	17	19	17	13	11	17
	M2	69	4	45	56	63	12	10	11	10	14	11	18
	M3	9	1	26	33	78	15	92	17	88		11	16
	M4	27	2	11	47	58	96	10	12	94	15	15	16
<i>Lysiloma divaricata</i>	M1	25	3	50	55	80	13	13	13		12	11	17
	M2	3	1	10	61	54	17	99	95	87	13	12	18
	M3	29	4	41	53	83	14	15	17	89	11	13	19
	M4	36	7	24	66	64	10	11	14	91	15	14	17
No Agroforestal	M1	75	2	40	79	82	18	13	10	13	11	16	18
	M2	39	1	12	70	71	17	14	19		12	14	16
	M3	42	3	43	8	57	11	12	14	18	15	13	19
	M4	22	1	15	62	67	16	97	15		14	12	18
	17	59	7	68	85	60			16		12	14	

Las modificaciones al método respondieron a que, de acuerdo con Anderson (1996), para mediciones de evolución de CO₂ por periodos de tiempos cortos, el procedimiento volumétrico es más sensible que el procedimiento gravimétrico descrito en su técnica considerando lo anterior y debido a la problemática detectada para su realización en campo, se decidió adaptar la propuesta de Anderson, así como el procedimiento marcado por Pramer y Schmidt, (1974).

Se determinó en las muestras de suelo el contenido de carbono y nitrógeno orgánico, mediante las técnicas propuesta por Walkley –Black (1934) y Microkjeldahl (Jackson, 1982); respectivamente; así como de acuerdo a USDA (1996), con base en el tamaño de fracción en mm (2, 1,0.5,0.25 y <0.25) Después del período de incubación de 32 días.

Determinación de la actividad microbiana a través de evolución de CO₂ a los 8, 16 y 32 días de incubación

La medición se realizó de acuerdo al método propuesto por Anderson (1996), UNESCO-UIBS (1989); Pramer y Schmidt (1974), al cual se le hicieron las modificaciones que se han descrito anteriormente como sigue:

Se usaron alícuotas de 0.1M de KOH expuesto en recipientes de plásticos con la adición de BaCl₂ saturado, donde la absorción de CO₂ es calculado en base a que 1 ml a 0.1M de HCl es equivalente a 2.2 de CO₂ ó 1ml 1M de HCl es equivalente a 22mg de CO₂.

A continuación se indica el procedimiento realizado a partir de las consideraciones anteriores.

1. Se pesaron la cantidad de suelo indicado de acuerdo a la humedad (tabla 4), que se menciona en los materiales y métodos), pero la proporción en cada una de las muestras fue a partir de 50 gramos de suelo.
2. Se colocaron en frascos y se agregó la cantidad de agua necesaria para llevar los suelos al 60% de la capacidad de campo.
3. Se agregaron la cantidad de hojarasca de acuerdo a la densidad aparente de cada una de las muestras de suelo, cumpliendo siempre la premisa de a partir de 3000 kg por hectárea.
4. Se agregaron 15 ml de NaOH a 0.1N por muestra.
5. Los frascos se colocaron dentro de las cámaras de plástico se cerraron herméticamente de tal manera que quedaron selladas.
6. Se metieron en un cuarto de incubación a temperatura controlada de 28 °C durante 8, 16 y 32 días. Al término de cada uno de los tiempos respectivos, se abrió la cámara por una sola ocasión.
7. A cada una de las muestras se le agregaron de 2 a 3 gotas de indicador (fenolftaleína al 1%), se agitó con una varilla de cristal hasta desaparecer el color rosa, registrándose la cantidad de HCl gastados en la titulación.
8. La evolución de CO₂ expresados en mg de CO₂ producido por cada 100 gr de suelos, para las muestras con tratamiento (hojarasca de *L. esculenta*, *L. divaricata* y *A. acatlensis*) y sin tratamiento (No AGF) es calculado en base a que 1 ml a 0.1M de HCl es equivalente a 2.2 de CO₂ ó 1ml 1M de HCl, equivalente a 22mg de CO₂.

5.6.2 Evaluación de la agregación en suelos por el efecto de algunas leguminosas nativas seleccionadas

5.7 Muestreo de suelos y preparación de láminas micromorfológicas

Para las láminas micromorfológicas se tomaron muestras de suelo de las franjas agroforestales de cada una de las leguminosas *L. esculenta*, *A. acatlensis*, *L. divaricata* y el testigo (No AGF). Se colectaron cuatro muestras de suelo aleatoriamente tanto en la época de lluvias (noviembre) como en la temporada de secas (abril). Dichas muestras fueron colectadas con el nucleador de manera que se conservaran las condiciones estructurales naturales (muestras físicamente inalteradas). Esto implicó que las muestras fueran vaciadas directamente en un contenedor diseñado especialmente para este fin. Posteriormente fueron transportadas al laboratorio para la preparación de las secciones delgadas. Mientras que las muestras de suelo que se utilizaron para realizar los análisis de

agregación fueron inmediatamente secadas al aire y se guardaron en bolsas de polietileno a 20 °C en el laboratorio de análisis. Las muestras fueron tamizadas a través de los tamices de 8,4, 2.8, 2, 1, 0.5, 0.25, > 0.25 mm.

Para la caracterización micromorfológica de los suelos, se realizaron secciones delgadas y se analizaron bajo el microscopio petrográfico con los métodos de Kubiena (1938). La preparación de las secciones delgadas consistió en tres etapas: (1) proceso de impregnación, (2) preparación de bloques y (3) preparación de láminas delgadas.

1. Proceso de impregnación

- a. Se secaron las muestras al aire por 24 h.
- b. Se colocaron en un recipiente previamente cubierto con aluminio.
- c. Se le agregó la mezcla de resina crista MC-40 preparada y acetona en una relación 1:1, después se añadió unas gotas de catalizador.
- d. Se colocaron las muestras en un aparato de impregnación a una presión de 25 a 27 pulgadas de Hg por un tiempo aproximado de 5 a 7 horas.
- e. Se dejaron las muestras a temperatura ambiente por 30 días.
- f. Se colocaron las muestras en una estufa bajo un régimen de temperatura de 50 °C por dos días.

2. Preparación de bloques

Después de la impregnación con resinas las muestras se cortaron. El tamaño de los bloques fue de 70 x 50 mm. Después los bloques se pulieron una de las superficies con una pulidora giratoria, utilizando lijas de los números 80, 120 y 600 para esmeril de carburo de silicio, cada vez más finos para finalmente obtener una superficie bien pulida. Se lavaron las muestras con gasolina a fin de eliminar todo el material abrasivo y se dejaron secar por completo.

3. Preparación de láminas delgadas

Para la fijación de las muestras de suelo en el portaobjetos se realizó con la misma mezcla de resina con catalizador que se utilizó en la impregnación. La muestra se pulió hasta alcanzar un espesor de aproximadamente 30 micras. Después los pulimentos fueron cubiertos con un portaobjetos.

Finalmente, los primeros análisis de las láminas delgadas fueron en un microscopio óptico regulando la apertura del diafragma, únicamente destacando la forma, el tamaño y desarrollo de la estructura de los agregados.

5.8. Dinámica de la formación de agregados

Observaciones cualitativas: Consistencia, plasticidad y adherencia.

Se hicieron observaciones de manera cualitativa como son la consistencia, plasticidad y adherencia, mismas que se interpretaron de acuerdo a lo propuesto por USDA- SSS (1990) Cualitativamente se

realizó la resistencia de los agregados y posteriormente se efectuó también con la técnica en húmedo de Savvinov.

Porcentaje de agregación en seco de manera cuantitativa

Se realizó también por el método de Savvinov (citado en Kaúrichev *et al* 1980); esta técnica permite apreciar el estado estructural del suelo.

Estabilidad de la agregación

Dado que por sí misma la evolución de CO₂ en el suelo, es un indicador de la actividad microbiológica del mismo, era importante tener una cuantificación en términos de la respuesta de los suelos a la incorporación de las plantas en forma de sistemas agroforestales, ya que no solamente era relevante determinar la influencia de las plantas sobre las características de los suelos, sino también evaluar el grado de la estabilidad de los agregados, por lo que se realizó la medición antes y después del experimento de CO₂ como a continuación se describe.

La estabilidad de los agregados se evaluó depositando 10 agregados, con diámetro entre 1 y 3 mm, en cápsulas de porcelanas y se saturaron con agua. Se rotaron suavemente por 30 segundos la cápsula en la palma de la mano, como se evaluó el grado de disgregación de los agregados de acuerdo a la siguiente relación de manera cualitativa en muy alta (1), alta (2), mediana (3), moderada(4) baja (5) y muy baja (6).

Análisis estadísticos

Se realizó un análisis multifactorial para comparar la resistencia de los agregados (estabilidad) antes de la incubación así como a los 8, 16 y 32 días de incubación para cada una de las especies, únicamente hubo estadísticamente diferencias significativas para *L. divaricata* a los 8 y 32 días de incubación. También se realizó un análisis de correlación entre la estabilidad de los agregados vs Ctotal. se usó el paquete estadístico Statgraphics ver. 1.3.

Análisis micromorfológico

Se analizaron las láminas delgadas en un microscopio óptico sin abrir el diafragma, únicamente destacando la forma, el tamaño y desarrollo de la estructura de los agregados, a estas observaciones en el microscopio se hicieron además otras de manera cualitativa como son la consistencia, plasticidad y adherencia, mismas que se interpretaron de acuerdo a lo propuesto por USDA- SSS (1990) y USDA (1993). Para la caracterización micromorfológica de los suelos, se realizaron secciones delgadas y se analizaron a través del microscopio petrográfico Zeiss con luz natural y luz polarizada. Las propiedades micromorfológicas fueron determinadas de acuerdo a lo descrito por Bullock, *et al*, (1985).

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Características diferenciadoras del suelo

6.2 Características morfogenéticas

Dentro de las características morfogenéticas se describirán la diagnosis general de los suelos, así como el origen, evolución y clasificación de los suelos del área de estudio.

Diagnosis general de los suelos

En esta descripción de la diagnosis general de los suelos se muestran la caracterización de los suelos y se encontró que en el área de estudio, localizada en la comunidad de San Nicolás Zoyatlán se distinguen, por las siguientes propiedades morfogenéticas: como suelos minerales, sin desarrollo de perfil, con excepción de un epipedón del tipo A antrópico o A mollico. En general son someros, gravosos que muestran evidencias fuertes de antropización.

El trabajo de campo permitió reconocer que los mejores suelos presentes en el área de estudio reúne los requisitos para ser ubicados en una clase Agrícola IV (Colegio de Postgraduados-SARH-SPP, 1991) la cual se caracteriza por tener un uso agrícola muy limitado, siendo el factor pendiente una de las limitantes que demeritan severamente a estos suelos.

Origen, evolución y clasificación de los suelos

Son suelos formados principalmente a partir del intemperismo de rocas félsicas (pobres en bases). Generalmente muestran en su perfil, remanentes de procesos de erosión ocurridos en épocas aún no determinadas cronológicamente. Debido a las condiciones de sitio (como la baja agresividad climática y que de acuerdo con García (1988), es de 149.5, así como gradientes pronunciados), la evolución natural de estos suelos se ve restringida por los factores ambientales que predominan en la zona y que se evaluaron como de baja agresividad, particularmente la precipitación. Probablemente el proceso más intenso que actualmente incide y determina su evolución es la antropización.

El comportamiento dinámico de estos suelos puede ser explicado a través de un modelo de toposistema similar al descrito por Conacher y Dalrymple (1977). En este modelo, el mesoclima y la vegetación original del área de estudio, estuvieron condicionados por el efecto de geoforma, orientación y altitud. Los suelos presentes en el área, cumplen con los requisitos para ser incluidos dentro del orden Entisol, suborden Orthents unidad Ustorthents, subunidad Lithic (Lithic Ustorthents). Estos suelos se consideran como Leptosoles eutrícos y mollicos así como también se denota la presencia de Regosoles antrópicos (World Reference Base for Soil Resources, 2006).

6.3 Características físicas y químicas de los suelos de las franjas agroforestales en dos épocas del año

Los resultados obtenidos de los análisis de suelos en general son indicativos del estado físico, químico y nutricional de los suelos, durante las épocas de sequía y lluvias. Los resultados obtenidos de los análisis físicos y químicos de los suelos se describen para cada una de las variables medidas del suelo antes señaladas (Tablas 1A, 1B, 1C y 1D).

A) Características físicas

a. Color

De acuerdo con los datos obtenidos acerca del color de los horizontes Ap, es posible considerar que, aunque muchos de ellos muestran cromas y tonalidades oscuras, no cumplen con los requisitos para ser considerados como horizontes A mólicos o A úmbricos, pero se califican como A ócricos (Leptosoles eutrícos). Esto se debe, principalmente, a que presentan una agregación incipiente (estructura) en la matriz de este horizonte. (Figura 1a y 1b, que muestra los peds).

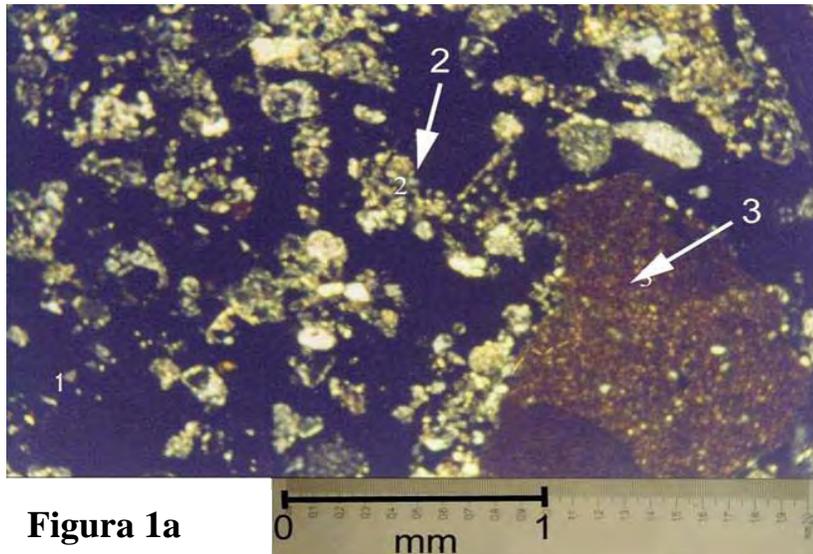


Figura 1a

1a (Suelo control = Sistema No Agroforestal es horizonte A ócrico) predominan partículas sueltas; 2= partículas de vidrio; 3= Líticos

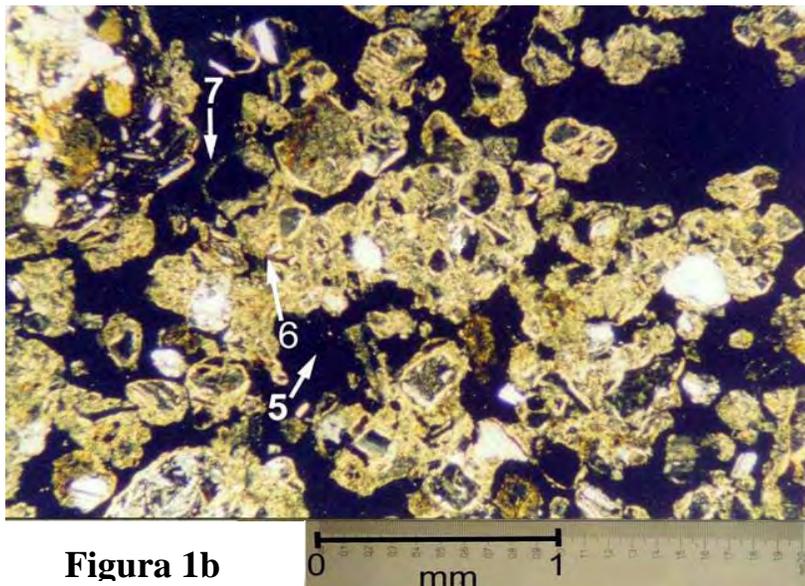


Figura 1b

1b (*Lysiloma divaricata* es un horizonte A mollico); 4= Agregados redondeados; 5= Poros; 6= Agregados subredondeados 7= Canales de raíces.

1A. Propiedades morfológicas y físicas de los suelos en la época de secas (abril)

SITIO NUMERO	HORI ZON TE	PROFUN DIDAD Cm	COLOR		ANALISIS DE TAMAÑO DE PARTICULA %				DENSIDAD APARENTE Mg m ⁻³	DENSIDAD DE PARTICULA Mg m ⁻³	POROSIDAD [%]	RELACION LIMO/ ARCILLA
			HUMEDO 0,33 Mpa	SECO 1,5 Mpa	ARENA 0.02-2.0mm	LIMO 0.02-0.002mm	ARCILLA <0.002mm	CLASE TEXTURAL				
1	Ap	0 – 30	2.5 Y 3/1	2.5 Y 5/2	65.6	16	18.4	Mra	1.2	1.9	36	0.87
2	Ap	0 – 30	5 Y 4/2	5 Y 6/2	63.6	18	18.4	Mra	1.2	2.4	50	0.98
3	Ap	0 – 30	2.5 YR 4/3	2.5 YR 6/3	51.6	22	26.4	Mra	1.1	2.3	52	0.83
4	Ap	0 – 30	10 YR 4/2	10 YR 6/2	53.6	20	26.4	Mra	1.1	2.5	55	0.76
5	Ap	0 – 30	7.5 YR 2.5/2	7.5 YR 4/2	55.6	18	26.4	Mra	1.1	2.3	53	0.68
6	Ap	0 – 30	7.5 YR 3/1	7.5 YR 4/1	55.6	24	20.4	Mra	1	1.8	44	1.18
7	Ap	0 – 30	7.5 YR 4/2	7.5 YR 5/2	51.6	22	26.4	Mra	1.1	1.5	28	0.83
8	Ap	0 – 30	7.5 YR 4/3	7.5 YR 4/1	51.6	20	28.4	Mra	1	1.3	25	0.7
9	Ap	0 – 30	2.5 YR 3/2	2.5 YR 5/2	53.6	18	28.4	Mra	1	2.3	56	0.63
10	Ap	0 – 30	2.5 YR 4/2	2.5 YR 4/1	55.8	18.1	26.1	Mra	1.2	2.4	50	0.66
11	Ap	0 – 30	2.5 YR 3/2	2.5 YR 5/1	53.6	20	26.4	Mra	1.2	2.2	47	0.76
12	Ap	0 – 30	2.5 YR 4/2	2.5 YR 4/1	51.6	20.4	28	Mra	1.2	2.1	44	0.73
13	Ap	0 – 30	2.5 Y 3/1	2.5 Y 6/1	64.8	16.4	18.8	Ma	1.2	2.4	51	0.87
14	Ap	0 – 30	2.5 Y 3/2	2.5 Y 5/2	54.8	22.4	22.8	Mra	1.1	2.9	62	0.98
15	Ap	0 – 30	2.5 Y 3/2	2.5 Y 5/1	54.4	18.8	26.8	Mra	1	2.4	58	0.7
16	Ap	0 – 30	2.5 Y 3/1	2.5 Y 4/1	44.4	18.8	36.8	Mr	1	2.2	56	0.51

Ma: Franco arenoso Mra: Franco arcilloarenoso Mr: Franco arcilloso

** Análisis realizado según Manual USDA, 1993. Modificado para las condiciones de México (Gama, 1996).

1B. Propiedades químicas y fisicoquímicas de los suelos en la época de secas (abril)

Propiedades Químicas y Fisicoquímicas de los Suelos

SITIO NUMERO	HO RIZON TE	pH		CIC [pH7] cmol(+)/kg ⁻¹	CIC / ARCILLA	BASES INTERCAMBIABLES				C g/Kg	Materia orgánica %	V Saturación de bases %	Ca ⁺⁺ / Mg ⁺⁺ Ca+Mg/K ⁺	N %	P ppm
		H ₂ O (1:1)	KCl (1:1)			Ca ⁺	Mg ⁺	Na ⁺	K ⁺						
		cmol (+)Kg ⁻¹													
1	Ap	7.45	7.15	26.70	1.45	8.25	0.40	3.13	2.00	2.48	51.61	20.63	4.33	0.105	1031
2	Ap	7.9	7.55	22.70	1.23	9.46	0.61	2.77	1.30	1.14	62.29	15.51	7.75	0.09	1172
3	Ap	8	7.45	34.05	1.29	10.65	0.78	3.09	2.88	1.75	51.10	13.65	3.97	0.09	500
4	Ap	6.85	7.15	31.40	1.19	6.76	0.77	2.69	2.59	2.15	40.80	8.78	2.91	0.14	1110
5	Ap	6.65	6.1	36.45	1.38	7.28	0.45	3.89	3.62	2.14	41.81	16.18	2.14	0.125	1172
6	Ap	6.75	6.4	35.75	1.75	8.93	0.67	3.03	3.74	2.28	45.79	13.33	2.57	0.07	500
7	Ap	4.95	4.55	27.25	1.03	4.34	0.40	1.43	1.28	2.28	27.34	10.85	3.70	0.105	1078
8	Ap	6.7	4.15	37.35	1.32	9.25	0.88	3.06	2.44	2.83	41.45	10.51	4.15	0.105	650
9	Ap	6.8	6.2	34.70	1.22	7.84	0.86	3.58	2.47	2.28	41.47	9.12	3.52	0.09	350
10	Ap	6.4	6.25	30.50	1.09	6.08	1.00	3.98	2.03	2.28	42.92	6.08	3.49	0.105	563
11	Ap	6.8	6.1	29.65	1.12	7.14	1.31	3.02	2.43	2.82	46.88	5.45	3.48	0.07	675
12	Ap	6.9	6.4	29.45	1.05	7.33	0.97	2.79	2.37	3.35	45.70	7.56	3.50	0.09	650
13	Ap	7.65	7.4	27.20	1.45	9.17	0.42	2.32	2.13	1.28	51.62	21.83	4.50	0.07	1125
14	Ap	7.9	7.3	26.25	1.15	9.41	0.42	3.20	1.20	0.81	54.21	22.40	8.19	0.12	656
15	Ap	7.55	7.35	31.30	1.17	9.95	0.32	3.46	2.41	2.08	51.56	31.09	4.26	0.09	1234
16	Ap	7.9	7.25	29.25	0.79	8.24	1.21	2.40	2.21	0.67	48.06	6.81	4.28	0.105	765

** Análisis realizado según Manual USDA, 1993. Modificado para las condiciones de México (Gama, 1996).

1C. Propiedades Morfológicas y físicas de los suelos en la época de lluvias (noviembre)

Propiedades morfológicas y físicas de los suelos

SITIO NUMERO	HORI ZONTE	PROFUN DIDAD Cm	COLOR		ANALISIS DE TAMAÑO DE PARTICULA %			CLASE TEXTURAL	DENSIDAD APARENTE Mg m ⁻³	DENSIDAD DE PARTICULA Mg m ⁻³	POROSIDAD [%]	RELACION LIMO/ ARCILLA	pH %
			HUMEDO 0,33 MPa	SECO 1,5 MPa	ARENA 0.02-2.0mm	LIMO 0.02-0.002mm	ARCILLA <0.002mm						
1	Ap	0-30	2.5 Y 3/1	2.5 Y 5/2	68	10.8	20.8	Mra	1.2	1.9	36	0.52	5.26
2	Ap	0-30	5 Y 4/2	5 Y 6/2	64.4	15.6	20	Mra	1.2	2.4	50	0.78	2.56
3	Ap	0-30	2.5 YR 4/3	2.5 YR 6/3	56.4	19.6	24	Mra	1.1	2.3	52	0.82	12.5
4	Ap	0-30	10 YR 4/2	10 YR 6/2	54.4	19.6	26	Mra	1.1	2.5	55	0.75	10.81
5	Ap	0-30	7.5 YR 2.5/2	7.5 YR 4/2	56.4	13.6	30	Mra	1.1	2.3	53	0.45	16.44
6	Ap	0-30	7.5 YR 3/1	7.5 YR 4/1	58.4	13.6	28	Mra	1	1.8	44	0.49	16.88
7	Ap	0-30	7.5 YR 4/2	7.5 YR 5/2	54.4	19.6	26	Mra	1.1	1.5	28	0.75	3.98
8	Ap	0-30	7.5 YR 4/3	7.5 YR 4/1	51.2	20.4	28.4	Mra	1	1.3	25	0.72	12.05
9	Ap	0-30	2.5 YR 3/2	2.5 YR 5/2	53.6	18	28.4	Mra	1	2.3	56	0.63	11.9
10	Ap	0-30	2.5 YR 4/2	2.5 YR 4/1	55.6	18	26.4	Mra	1.2	2.4	50	0.68	15.85
11	Ap	0-30	2.5 YR 3/2	2.5 YR 5/1	47.6	18	34.4	Mra	1.2	2.2	47	0.52	19.74
12	Ap	0-30	2.5 YR 4/2	2.5 YR 4/1	56	18	26	Mra	1.2	2.1	44	0.69	11.11
13	Ap	0-30	2.5 Y 3/1	2.5 Y 6/1	57.6	24	18.4	Ma	1.2	2.4	51	1.3	3.45
14	Ap	0-30	2.5 Y 3/2	2.5 Y 5/2	54	20	26	Mra	1.1	2.9	62	0.77	15.94
15	Ap	0-30	2.5 Y 3/2	2.5 Y 5/1	52	16	32	Mra	1	2.4	58	0.5	15.19
16	Ap	0-30	2.5 Y 3/1	2.5 Y 4/1	53.6	20	26.4	Mra	1	2.2	56	0.76	17.86

** Análisis realizado según Manual USDA, 1993. Modificado para las condiciones de México.

Ma: Franco arenoso Mra: Franco arcilloarenoso

1D. Propiedades químicas y fisicoquímicas de los suelos en la época de lluvias (Noviembre)

Propiedades químicas y fisicoquímicas de los suelos

SITIO NUMERO	HORIZONTE	pH		CIC [pH7] cmol(+)kg ⁻¹	CIC / ARCILLA	BASES INTERCAMBIABLES				C g/Kg	Materia orgánica %	V Saturación de bases %	Ca ⁺⁺ / Mg ⁺⁺	Ca+Mg/K ⁺	N %	P Total ppm
		H ₂ O (1:1)	KCl (1:1)			Ca ⁺	Mg ⁺	Na ⁺	K ⁺							
1	Ap	8	7.4	27.65	1.33	7.99	0.92	3.32	2.53		2.01	53.38	8.68	3.52	0.035	687
2	Ap	8	7.4	25.30	1.27	8.17	0.80	2.88	1.31		1.61	52.02	10.21	6.85	0.09	688
3	Ap	8.15	7.3	27.40	1.14	9.88	0.70	2.30	1.28		1.54	51.68	14.11	8.27	0.09	797
4	Ap	7.9	7.3	24.85	0.96	8.41	0.97	2.19	1.15		2.01	51.19	8.67	8.16	0.12	1140
5	Ap	6.75	6.15	31.95	1.07	6.89	0.98	4.03	3.74		2.28	48.95	7.03	2.10	0.07	1297
6	Ap	6.3	5.65	23.85	0.85	5.74	0.95	1.19	0.99		2.95	37.19	6.04	6.76	0.16	784
7	Ap	6.5	5.75	30.60	1.18	5.64	1.09	2.11	1.55		2.69	33.95	5.17	4.34	0.07	656
8	Ap	6.85	5.4	23.45	0.83	5.21	1.24	1.73	1.33		1.48	40.55	4.20	4.85	0.105	843
9	Ap	6.8	5.75	24.60	0.87	6.49	0.80	2.35	1.57		2.95	45.56	8.11	4.64	0.155	687
10	Ap	6.6	5.9	24.65	0.93	5.46	1.14	2.17	1.13		1.48	40.16	4.79	5.84	0.085	1094
11	Ap	8	7.1	26.80	0.78	10.61	0.67	2.24	1.52		1.88	56.12	15.84	7.42	0.05	688
12	Ap	7.35	6.6	29.35	1.13	8.49	0.34	3.21	2.19		1.88	48.48	24.97	4.03	0.105	288
13	Ap	7.6	7.3	27.95	1.52	8.56	0.52	2.93	2.43		1.14	51.66	16.46	3.74	0.105	600
14	Ap	8	7.35	32.20	1.24	10.24	0.61	3.16	2.40		0.87	50.96	16.79	4.52	0.125	725
15	Ap	6.3	6.05	30.75	0.96	7.44	0.95	2.37	1.77		2.68	40.75	7.83	4.74	0.125	425
16	Ap	7.7	7.35	31.50	1.19	8.95	0.94	3.28	2.41		1.75	49.46	9.52	4.10	0.05	783

*Análisis realizado según Manual USDA, 1993. Modificado para las condiciones de México

Ap: Horizonte plaggen

b. Texturas

Las texturas determinadas en ambas épocas de secas y lluvia resultaron predominantemente franco arcillo-arenosas (Muestras 1-12, 14-15) a excepción de las muestras 13 (Franco arenosa) y 16 (Franco arcilloso). Este tipo de texturas resultan ser muy común en México en áreas cuya vegetación original fue de selva baja caducifolia (Gama, 1996).

Se estima que este tipo textural puede ocasionar algunas dificultades para la labranza y manejo del agua, debido a que durante la época de secas algunos horizontes que muestran dicha texturas tienden a compactarse, especialmente si los contenidos de materia orgánica son pobres.

c. Densidad aparente

Algunos horizontes como son el 1, 2, 10,11, 12 y 13 tienden a presentar una ligera compactación, en épocas de secas y lluvia. (Tablas 1A y 1C). Los demás horizontes según se puede apreciar en las mencionadas tablas muestran un valor de densidad aparente que permite una buena aireación, paso del agua y crecimiento radicular.

d. Densidad de partícula

Los valores de densidad de partícula se conservan estables durante todo el año. Sin embargo con excepción del valor asignado para la muestra 14 todos los demás valores resultan de moderados a bajos (Menores que 2.6 mg/m^3). Estos valores permiten interpretar que los minerales ferromagnesianos en estos suelos son escasos, predominando los minerales félsicos (con altos contenidos en Sílice). Por lo tanto, el mayor aporte de minerales ferromagnesianos a las plantas y suelos es a través del biociclaje y de las adiciones eólicas, hídricas o antrópicas.

e. Porosidad

Con excepción de las muestras 1, 7 y 8 que presentan una porosidad muy baja (Tabla 1A y 1C), probablemente debido a la compactación. Todas las demás muestras, presentan esta propiedad en un nivel muy adecuado para el crecimiento vegetal.

f. Relación Limo/Arcilla

Los valores de la relación limo/arcilla para las dos épocas del año son indicativos de un bajo desarrollo edafogénico en los suelos estudiados. En ningún caso estos valores son menores que 0.03, valor estimado como representativo para suelos del trópico bien desarrollados (Gama, 1996). Las variaciones que se observan entre el muestreo realizado en abril y en el de noviembre son atribuibles al manejo del suelo que generalmente propicia la destrucción de los agregados, así como la formación de terrones que se caracterizan por sus artificios estructurales y texturales.

B) Características químicas

a. pH

Los valores de pH en agua, determinados para las muestras colectadas en la época de secas, oscilan desde 4.95 (fuertemente ácidos) hasta 8 (alcalinos); mientras que las colectadas en la época de lluvias los valores fluctúan entre 6.3 (ácidos) hasta 8.15 (alcalinos). Esta variabilidad tan significativa en el pH que se presenta en ambas épocas y en un espacio físico tan reducido (Figura 2A, 2B, 2C y 2D) es principalmente atribuible a las condiciones de sitio (Geosfera). Entre las principales condiciones de sitio se destaca: la naturaleza variable del material parental (suma de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ en relación con la CIC); la microtopografía, la retención de humedad y evaporación. Desde luego se considera que algunos elementos ricos en carbonatos que pueden

elevar el pH, deben ser adicionados a este sistema ya sea de forma natural como cal agrícola o a través de la fertilización.

b. CICT y Bases Intercambiables

Con excepción de la muestra 2, las demás presentan valores altos de CICT que le confieren a estos suelos un potencial de fertilidad natural alto. Sin embargo, los contenidos de bases intercambiables son relativamente bajos; en ocasiones la suma de estos cationes con relación a la capacidad de intercambio catiónico es menor que el 50%. Esto significa que se trata de suelos pobres en bases que requieren la aplicación de abonos orgánicos o de fertilización. Particularmente la relación $\text{Ca}^{++}/\text{Mg}^{++}$ muestra que en todos los suelos se presentan deficiencia significativa de Mg^{++} . También es notable que la presencia de Na^+ sea alta en relación a la capacidad de intercambio catiónico; aunque no presenta valores para considerarse como fase sódica, debe tenerse cuidado con la geodinámica de este elemento. Otros datos interesantes son los que se obtienen a partir de la relación $(\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++})/\text{K}^+$ que indica que, este último elemento, es muy abundante proporcionalmente a las concentraciones de la suma de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$.

c. MO

Desde el punto de vista agrícola, los contenidos de materia orgánica durante la época de secas oscilan desde muy bajos (muestras 2,13 ,14 y 16), bajo (muestra 3), normal a medio (muestras 15, 5,4, 6, 7, 9, 10) y alto (muestras 1, 11, 8 y 12). En la época de lluvias los valores oscilan desde muy bajos (Muestra 14, 3, 13, 8 y 10), bajos (16, 11,12 y 2); normal a medio (muestras 4, 1, 5,) y alto (muestra 1, 9 y 6). La oscilación que se observa en los porcentajes de MO así como las fluctuaciones que se presentan entre la época de secas y la época de lluvias (Tablas 1B y 1D) se deben probablemente, al manejo de estos suelos el que propicia diferentes tasas de mineralización. Se encontró, además que los valores más bajos de MO tienden a presentarse en aquellos sitios que están más desprovistos de vegetación (13,14 y 16).

En resumen, como se observa en las tablas 1A, 1B, 1C y 1D la mayoría de los suelos utilizados en este experimento se caracterizaron por ser someros, poco desarrollados, de grano suelto y texturas gruesas a medias. En su mayoría se tratan de suelos desbasificados y presentan contenidos moderados a bajos de materia orgánica. Sin embargo, los valores de capacidad de intercambio catiónico les confieren un nivel de fertilidad potencial alto (USDA, 2003). Dichos valores están conferidos, principalmente por la presencia de cargas variables, derivadas del intemperismo del vidrio volcánico. La reacción de Fieldes y Perrot para detectar alofano resultó positiva en todas las muestras analizadas. Estos suelos cumplen con los requisitos taxonómicos para ser considerados como Regosoles y Leptosoles con horizontes vítricos (World Reference Base for Soil resources, 2006).

A partir de las gráficas (Figura 2A, 2B, 2C, y 2D) resultantes de los análisis de suelos; se muestra una variación espacial muy congruente, donde se aprecia una tendencia muy ligera a un decremento en la M.O. en noviembre, debido probablemente a su mineralización. Al hacer la comparación del porcentaje de arcilla vs CICT vs MO, se observan cuatro regiones en las gráficas (Figura 2B). En cada una de estas regiones con frecuencia se nota un incremento notable de la capacidad de intercambio catiónico en relación con el porcentaje de arcillas. Esto puede ser indicativo de la presencia de arcillas amorfas de alta capacidad (Ferridrita y alofano) como de algunos compuestos amorfos orgánicos muy humificados similares a ácidos fúlvicos y húmicos.

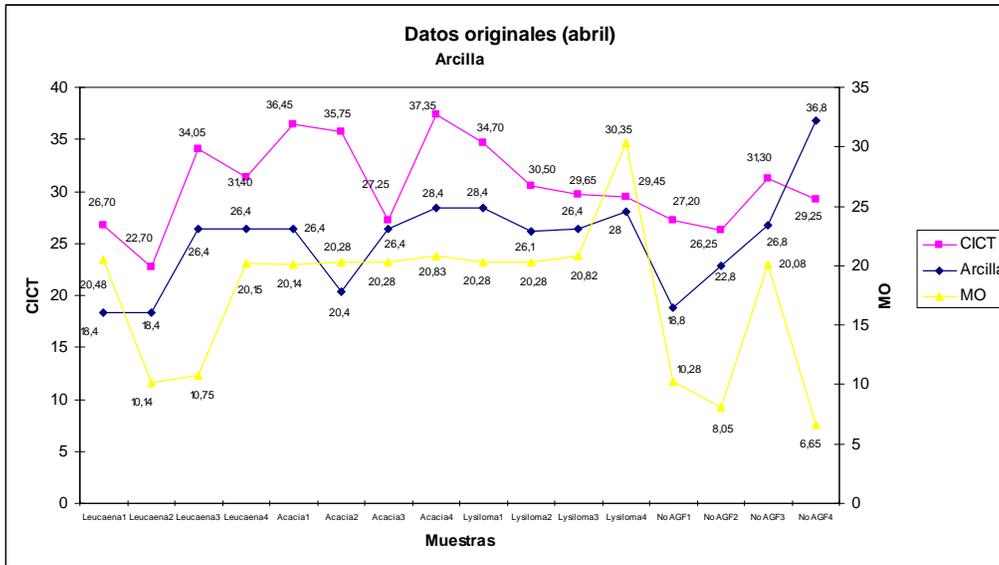


Figura 2A. Comparación del porcentaje de arcilla vs CICT vs MO por sitios y por época del año, en datos originales (abril).

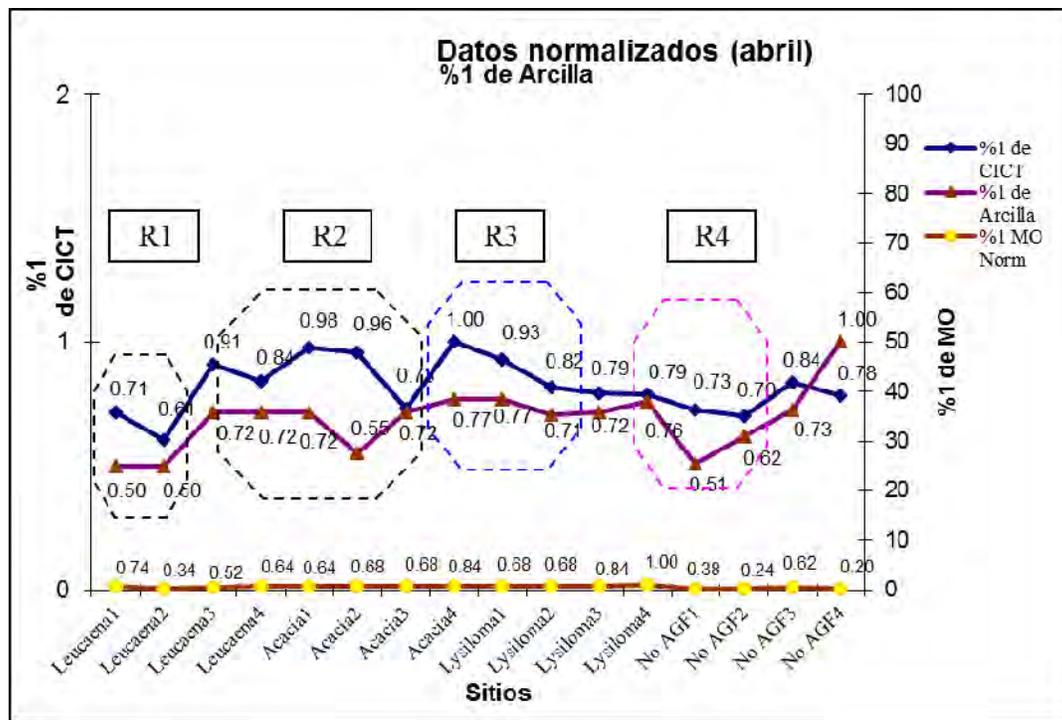


Figura 2B. Comparación del porcentaje de arcilla vs CICT vs MO por sitios y por época del año (abril), datos normalizados a la unidad.

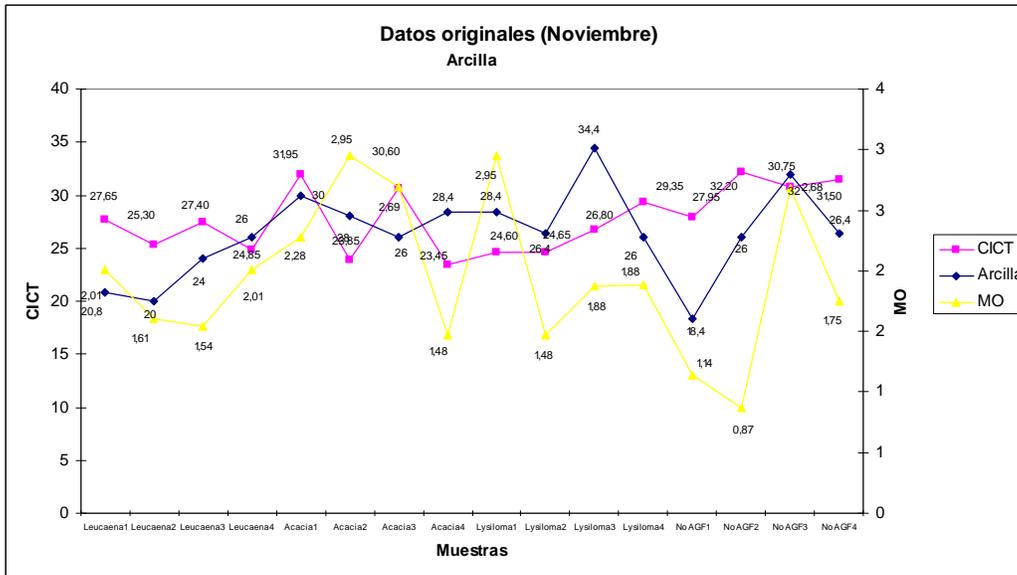


Figura 2C. Comparación del porcentaje de arcilla vs CICT vs MO por sitios y por época del año, en datos originales (noviembre)

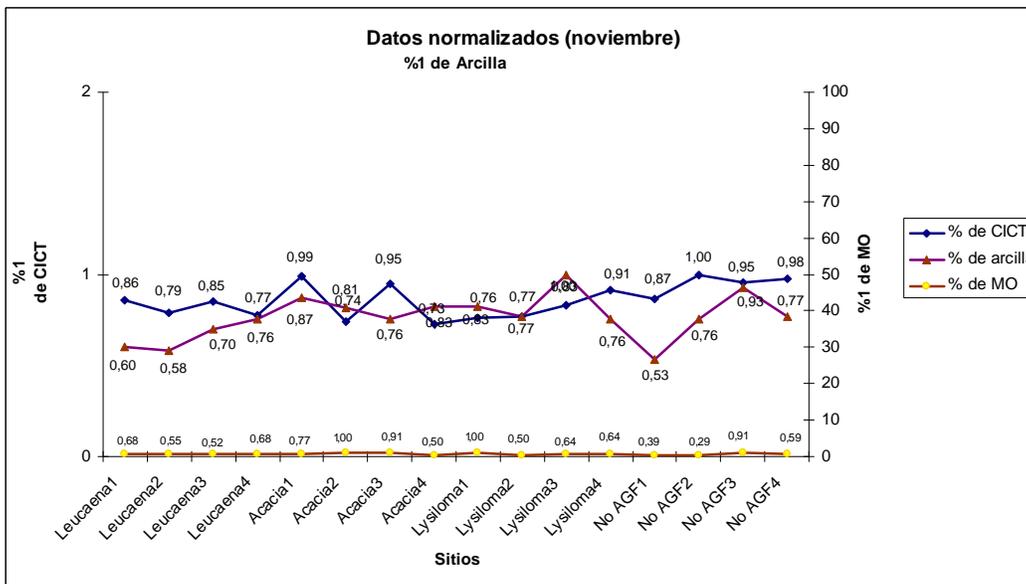


Figura 2D. Comparación del porcentaje de arcilla vs CICT vs MO por sitios y por época del año (noviembre), datos normalizados a la unidad.

En las Figuras 2A, 2B, 2C y 2D también se observan los cambios dinámicos en la relación CICT-Arcilla durante las dos épocas en que se muestrearon estos suelos.

Al realizar los análisis estadísticos, se obtuvieron diferencias altamente significativas mostradas en los valores de Ca ($p = 0.0247^*$), MO ($p = 0.0091^*$) y saturación de bases en abril ($p = 0.0441^*$) y en noviembre ($p = 0.0484^*$) son de muy baja magnitud como para afectar la relación suelo-planta (Figuras 3A, 3B, 3C y 3D).

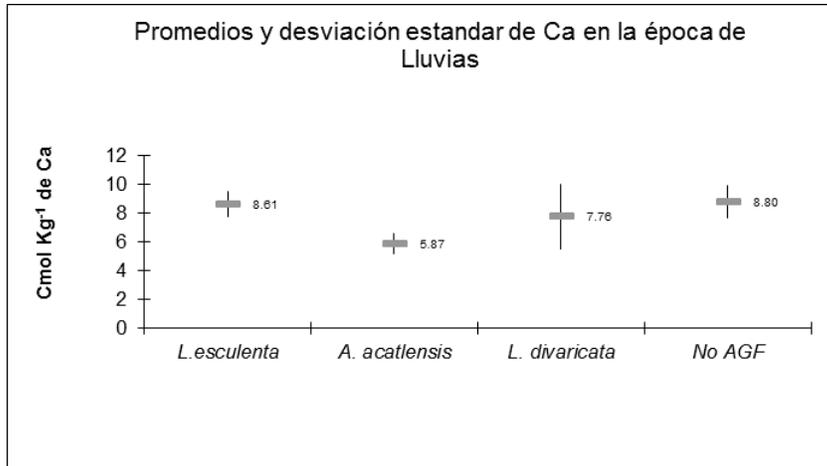


Figura 3A. Promedios y desviación estándar de Ca en la época de Lluvias

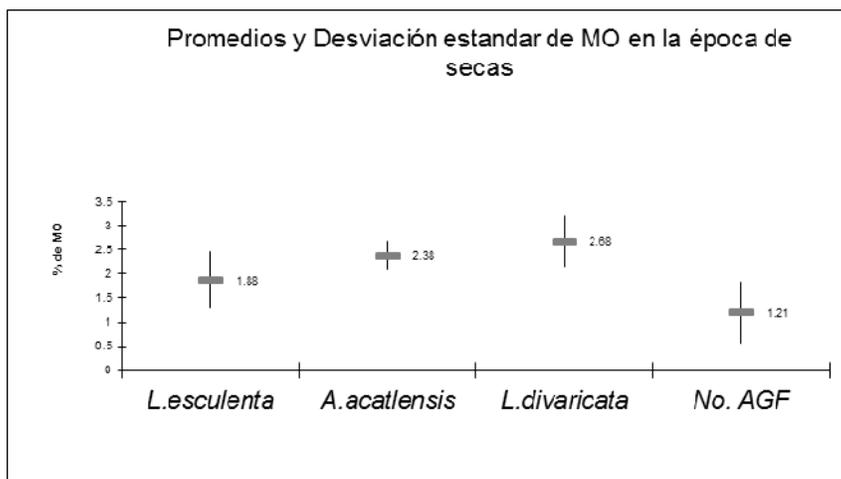


Figura 3B. Promedios y desviación estándar de MO en la época de secas

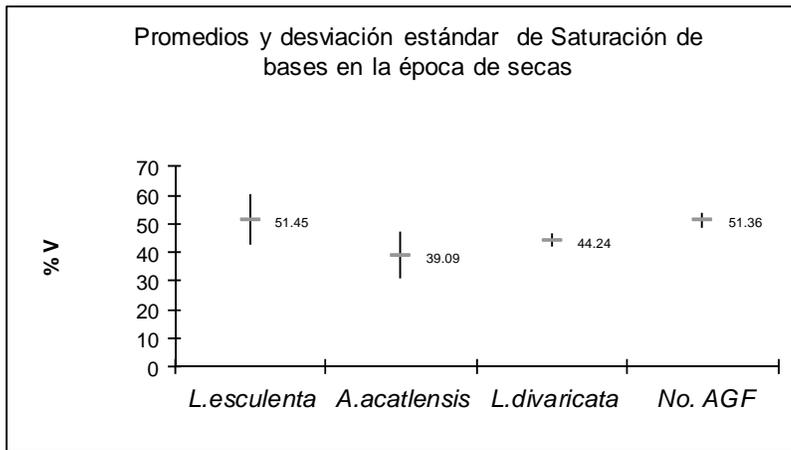


Figura 3C. Promedios y desviación estándar de Saturación de bases en la época de secas

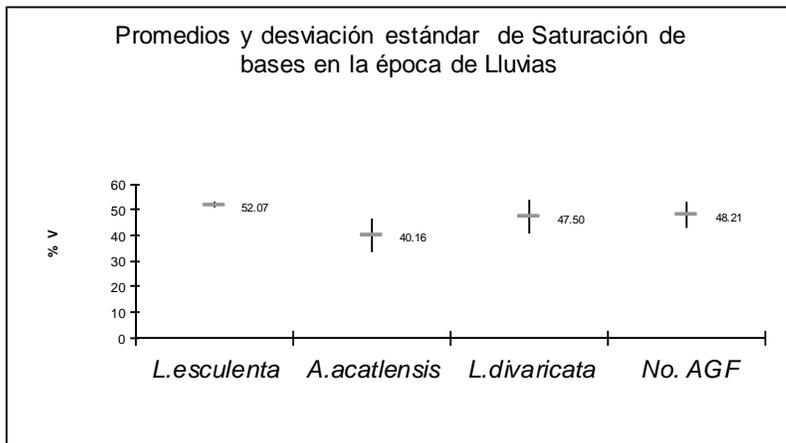


Figura 3D. Promedios y desviación estándar de Saturación de bases en la época de lluvias.

6.4 La importancia de la MO y la dinámica de los microorganismos

Es bien conocido el hecho de que el manejo de la materia orgánica es el corazón de la agricultura sustentable. En este sentido, muchas investigaciones indican que las propiedades estructurales de los suelos en los trópicos, son profundamente influenciadas por el contenido de la MO y por la actividad biótica particularmente de la fauna del suelo, de tal forma que las prácticas de manejo que afectan los contenidos de MO y actividad biótica afectan por lo tanto la estructura del suelo (Stevenson, 1994).

La materia orgánica tiene también un profundo efecto sobre la disponibilidad de los nutrientes para el crecimiento de las plantas, sirviendo como fuente de N, P y S, entre otros nutrientes, a través de la mineralización que llevan a cabo los microorganismos del suelo.

El mencionado autor comenta que la MO, particularmente la hojarasca y la fracción ligera sirven como fuente de energía para la macro y microfauna y también para la microflora. Sin embargo, aunque el papel que juega la fauna no ha sido completamente descrito, las funciones que ellos realizan son múltiples y variadas ya que algunos contribuyen al desarrollo de la buena estructura del suelo (como son las lombrices de tierra), además de dar mayor aireación y drenaje.

6.5 Características de los suelos y su relación con los rendimientos de maíz asociados a leguminosas bajo sistemas agroforestales.

Esta parte de los resultados iniciará describiendo los obtenidos referente al cultivo de maíz para el caso de la Montaña de Guerrero, en la comunidad de San Nicolás Zoyatlán, donde se practican cuatro sistemas de producción agrícola: (1) el barbecho, (2) calmil, (3) riego y (4) tlacolole y de acuerdo con estos mismos autores, los rendimientos de maíz se encontraban entre 500 y 700 kg por hectárea en la comunidad, estos rendimientos se consideran muy bajos, El rendimiento con las cosechas de maíz en el sistema de barbecho oscilan entre 700 y 1400 kg por hectáreas.

Las variables que explican los rendimientos son: la dosis de fertilización, el total de labores realizadas y el tipo de cultivo, vegetación o manejo del año anterior. De la evaluación realizada por Programa de Aprovechamiento Integral de los Recursos Naturales (PAIR) a cerca de estas prácticas, se obtuvo un coeficiente de regresión de 0.60.

Al realizar el análisis de fertilidad de los suelos, en general se demuestra que los suelos son muy pobres para la agricultura. Sin embargo en algunas zonas de San Nicolás Zoyatlán presentan ventajas importantes por sus características edafológicas, existiendo variaciones, incluso dentro de una misma parcela, ello está definido por las “clases campesinas” de tierras, así la diversidad geológica presente en la comunidad que permite que en un espacio reducido, se encuentren suelos muy diferentes entre sí y, por lo tanto que existen muchas áreas de transición.

Finalmente, en sus resultados Hernández (1996) muestra que la producción de maíz varía entre 0.5 y 2 toneladas por hectárea. Dentro de las características más relacionadas con la clasificación campesina de tierras están textura, color, densidad y cantidades de P y MO, las cuales son las variables que mayor diferenciación presentan en las tierras más representativas de la región. De acuerdo con la autora antes citada, en esta localidad, la parcela objeto de la presente tesis es clasificada, con base en su fertilidad, en las clases de tierras es entre 1 y 6. La clase 1 significa fertilidad muy baja y la 6 fertilidad baja. La clase 6 corresponde geomorfológicamente a una loma el suelo se clasifica como tlalnectli (tierra como ceniza), son suelos poco profundos con pendientes entre 11 y 25 grados, en esta zona los campesinos consideran que se guarda menos humedad; y la 1 son terrenos aluviales.

En las regiones del país basadas en una economía de subsistencia, como la que predomina en San Nicolás Zoyatlán localidad objeto del presente trabajo, el cultivo de maíz toma otras dimensiones que la caracterizan por ser para el autoconsumo, cuya producción se basa, principalmente, en la utilización de agroquímicos con dosis bajas y generalmente en el descanso de la tierra, el control de herbáceas mediante el barbecho y la utilización de insecticidas. La importancia de este cultivo está dada por los gastos que tendrían que invertir las unidades familiares en caso de no sembrarlo; es decir, lo más importante es el valor de uso, mientras que, por otro lado, los productores consideran el manejo de los sistemas agroforestales más bien como una estrategia de conservación de los suelos más que para la producción o, por lo menos, para aplicarlo a largo plazo.

En el presente estudio el rendimiento en promedio para el testigo (No Agroforestal) fue de 568.29 kg/ha, el promedio para la franja con *Acacia acatlensis* fue de 527.63 kg/ha, mientras que para la franja con *L. divaricata* en promedio fue de 509.68 kg/ha (Figuras 4).

Los rendimientos por sitios oscilan entre 503.61 kg/ha (Sitio 1, de la franja agroforestal con *L. divaricata*) y de 593.83 kg/ha que corresponde a los sitios cuatro y 10 del No Agroforestal (Figura 5).

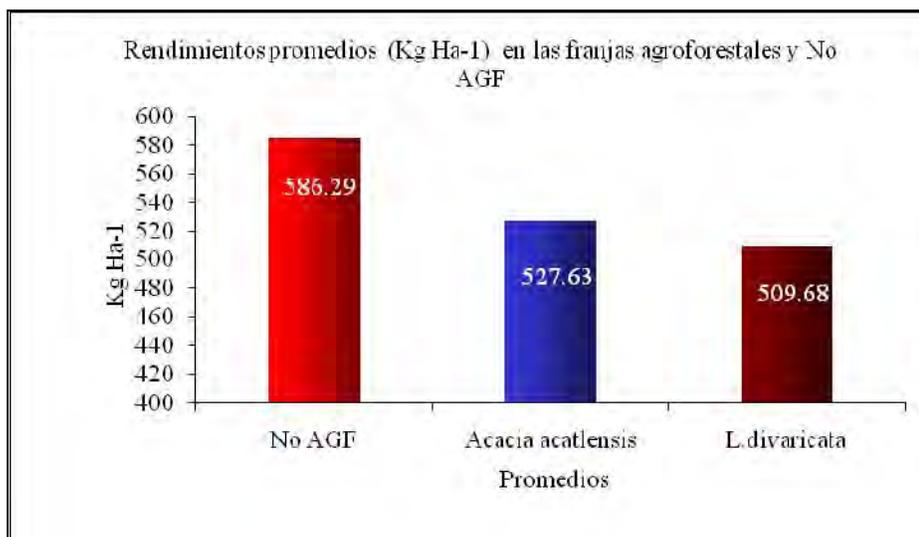


Figura 4. Rendimientos promedios (Kg Ha⁻¹) en las franjas agroforestales y No AGF.

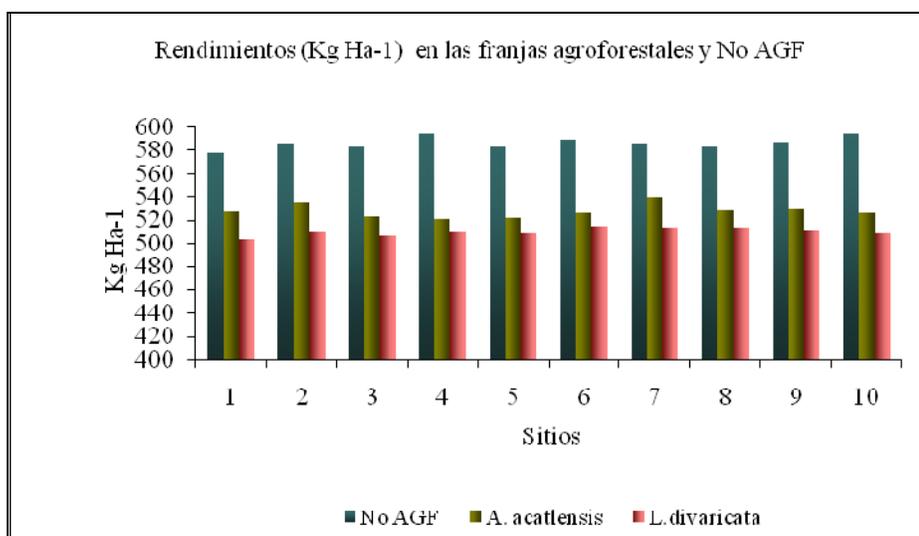


Figura 5. Rendimientos por sitio (Kg Ha-1) en las franjas agroforestales y No AGF

Ahora bien, para este apartado en este trabajo se trata de relacionar las características de los suelos sometidos a sistemas agroforestales y los rendimientos de maíz; debido a la potencialidad de las plantas para mejorar el suelo considerando que estas no compitan con el cultivo principal (maíz). En consecuencia, existen ventajas y desventajas que son consideradas para que el productor rural tome la decisión de adoptar los sistemas agroforestales. Para comprender el

comportamiento de los rendimientos de los cultivos bajo dicho sistema, necesariamente se requiere de enumerar las investigaciones realizadas al respecto, principalmente en las zonas tropicales. En ese sentido Sánchez (1981) ha considerado que, en general, entre menor sea la fertilidad de un suelo tropical, mayor será la probabilidad de una degradación permanente causada por la intervención humana, destacando que el mantenimiento de la materia orgánica del suelo cultivado, en ciertos límites, es uno de los problemas críticos de la agricultura, dado que se refleja en los rendimientos de los cultivos. De modo adicional documentó que son varias las razones por lo que existe el descenso de los rendimientos, entre ellas destacan:

- De todas las propiedades del suelo se ha documentado ampliamente la importancia que significa mantener la materia orgánica en su nivel adecuado, dado que representa la base de la fertilidad de los suelos y debido a que es la fuente de los nutrimentos principales como el nitrógeno, fósforo y el azufre, por consecuencia tiene una influencia directa en los rendimientos (Gati, 1983).
- Varios autores afirman, que los cambios que la actividad humana produce en el suelo, son responsables del descenso del rendimiento de los cultivos; asimismo ha quedado claro que la erosión del suelo puede ser la causa principal de la declinación de los rendimientos (Nye y Greenland, 1970, Watters, 1971).
- Por otra parte, el aumento en la incidencia de plagas y enfermedades sobre los rendimientos, es otro factor importante que incide en el rendimiento de las cosechas, particularmente porque en los monocultivos continuos generalmente se intensifican los ataques de plagas; sin embargo, los productores han evitado o minimizado estos problemas mediante el uso de secuencias de cultivos intercalados como ocurre con los sistemas agroforestales y, a menudo, sembrando variedades de cultivo que tienen tolerancias a las enfermedades (Sánchez, 1991).

Lo descrito antes, da cuenta de la relación tan estrecha que existe entre las características de los suelos y los rendimientos, esta situación impulsa a los productores a utilizarla como estrategia el uso de los sistemas agroforestales. En este contexto se hace notar, la potencialidad que tienen las plantas para mejorar el suelo y la no competencia de las mismas con el cultivo principal.

Se destaca, además, que el uso de sistemas agroforestales donde se combinan leguminosas con maíz para el caso de América Central responde sobre todo, a una estrategia de conservación de suelos más que a una estrategia de producción, por lo que los agricultores generalmente no generan grandes expectativas en términos de rendimientos (Kass, *et al.*, 1997).

En la búsqueda por encontrar diversas maneras de como hacer que los sistemas agroforestales en la modalidad de cultivos en callejones sean más productivo, sostenibles y adecuado a pequeños productores, se han realizado diversos experimentos en África, Asia y América Latina, principalmente con Leucaena y maíz así como con algunas otras especies forestales (Kass, *et al.*, 1997; Jiménez *et al.*, 1994)

Los resultados de estas investigaciones muestran que los rendimientos de cultivos en callejones no superaron los de los monocultivos, ya que los nutrimentos liberados, especialmente el nitrógeno de la biomasa de los árboles, no estaba disponible cuando los cultivos lo necesitaron; sin embargo, el sistema mejoró la calidad de los suelos en la mayoría de los casos, aumentando cantidades significativas de materia orgánica, las bases intercambiables y mejorando las propiedades físicas del suelo. Asimismo, resultó importante, además, encontrar que el sistema fue muy efectivo para controlar la erosión en suelos de ladera, especialmente cuando las líneas de los árboles eran plantadas siguiendo las curvas de nivel (Garrity, 1993; Sánchez, 1995). Como es el caso en que se plantaron las leguminosas en las franjas agroforestales para el experimento de ésta tesis (en curvas a nivel).

No obstante las virtudes antes señaladas, también es necesario mencionar que existen ciertas desventajas tales como la de proporcionar retornos iniciales limitados sobre la inversión, por los que los agricultores en general tienen que esperar 3 ó 4 años antes de lograr un incremento de los rendimientos, debido al tiempo que toma el mejoramiento del suelo, a menos que los beneficios a corto plazo como combustible, forraje y provisión de postes, sean un valor significativo, los agricultores se resisten a adoptar esta tecnología.

6.6 La actividad microbiológica a través de la evolución del CO₂ en suelos bajo sistemas agroforestales

Análisis de las plantas

La composición química del follaje revela una baja relación C:N, sin embargo no se encontraron diferencias significativas entre las especies (Tabla 2). El N total detectado en las plantas del experimento fueron altas comparadas con otras especies de leguminosas tales como: (Oorts et al, 2000). Estos resultados corresponden a un efecto potencial alto de mineralización del N y un mejor balance de nutrimentos (Lal, 1989). La baja relación C:N son características de niveles altos de mineralización de MO (Tornquist, *et al.*, 1999; Zhan *et al.*, 2007), que en este caso sería similar para las tres especies estudiadas.

Relación C/N en la hojarasca.

Tabla 2. Concentración de carbono y nitrógeno de las hojas de las leguminosas seleccionadas

Tratamientos	C gKg ⁻¹	N gKg ⁻¹	C:N
<i>Leucaena esculenta</i>	303.2	29.8	10.17
<i>Acacia acatlensis</i>	330.4	33.3	9.68
<i>Lysiloma divaricata</i>	322.6	34.1	9.46

Evolución del CO₂ para cada una de las especies.

La evolución del CO₂ a los 8 días de incubación *L. esculenta* es el único tratamiento que mostró diferencias significativas con respecto a los otros tratamientos (*A. acatlensis* y *L. divaricata*) y el testigo (figura 9).

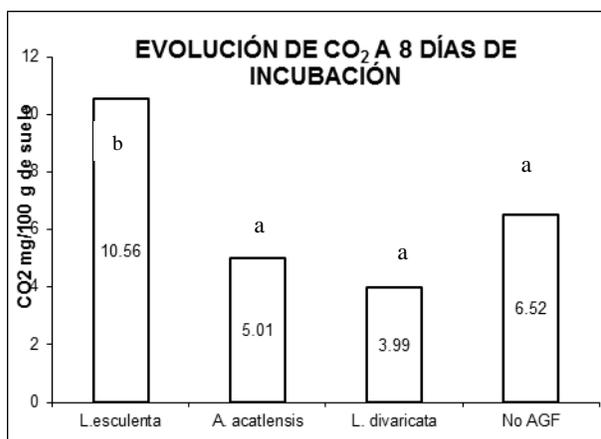


Figura 9. Evolución de CO₂ por especie y el testigo a los 8 días de incubación

A los 16 días de incubación se observan diferencias significativas entre los tratamientos y el testigo ($p=0.0062$) como se muestra en la figura 10; sin embargo esta tendencia no logra mantenerse hasta el final del período de incubación (32 días) ya que únicamente existen diferencias significativas entre el tratamiento con *L. esculenta* y el testigo ($p= 0.175$), como se muestra en la figura 12.

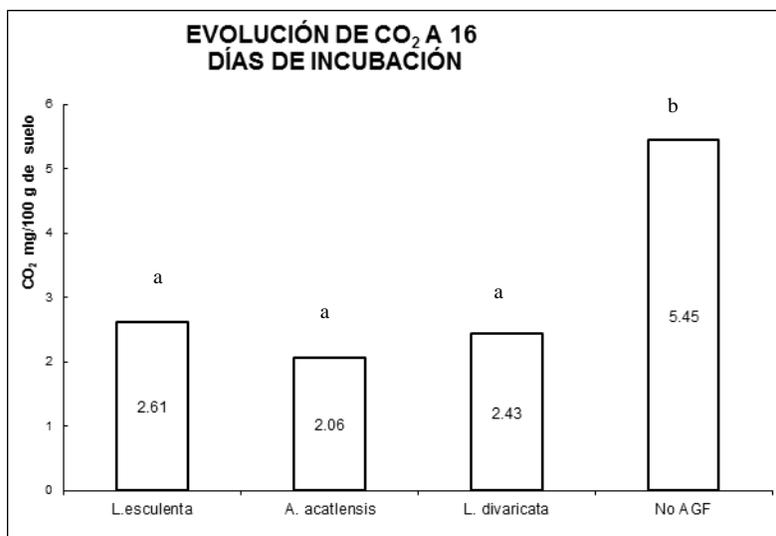


Figura 10. Evolución de CO₂ por especie y el testigo a los 16 días de incubación

El comportamiento de cada uno de los tratamientos fue diferencial en la evolución del CO₂, la mayor cantidad de CO₂ evolucionado es para el tratamiento con *L. esculenta* mientras que el más bajo fue para el testigo (figura 11).

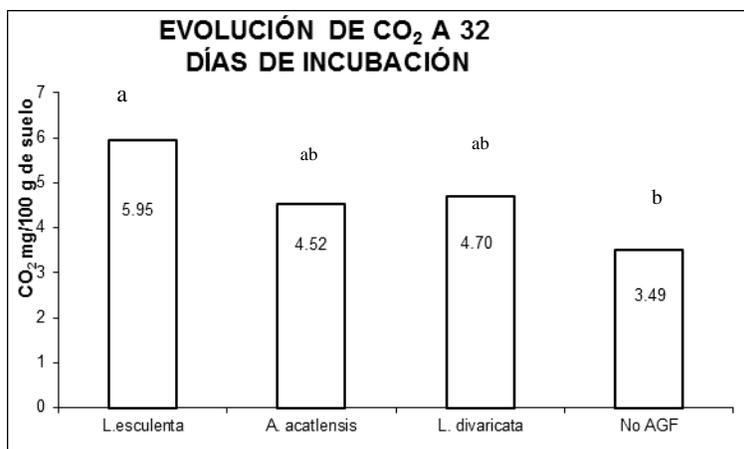


Figura 11. Evolución de CO₂ en suelos con tres especies de leguminosas y el testigo (No AGF).

Respecto a que el período de incubación se encontró diferencias significativas ($p \leq 0.01$) entre las leguminosas y el periodo de incubación Figura 6. Estos resultados son debido a las diferentes relaciones C:N de cada leguminosa, dado que este índice C/N controla la mineralización o evolución de CO_2 (Zhan *et al.*, 2007).

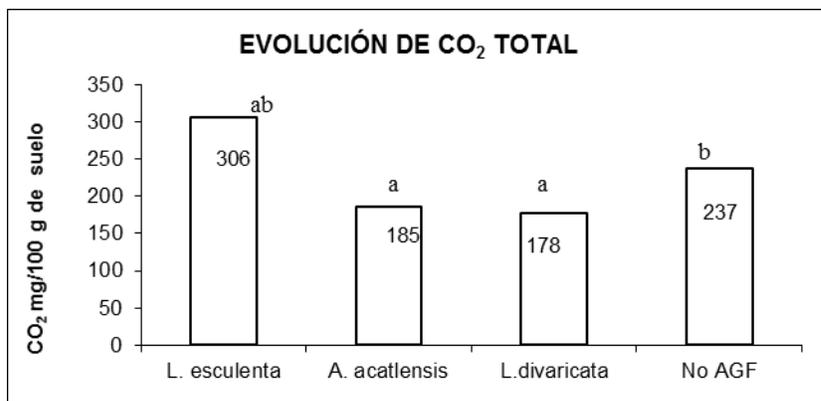


Figura 12: Evolución de CO_2 total acumulado a los 32 días de incubación.

También, tal como se puede apreciar en la Figura 13, estas características de esta leguminosa (*L. esculenta*) produce un buen efecto sobre la agregación del suelo.

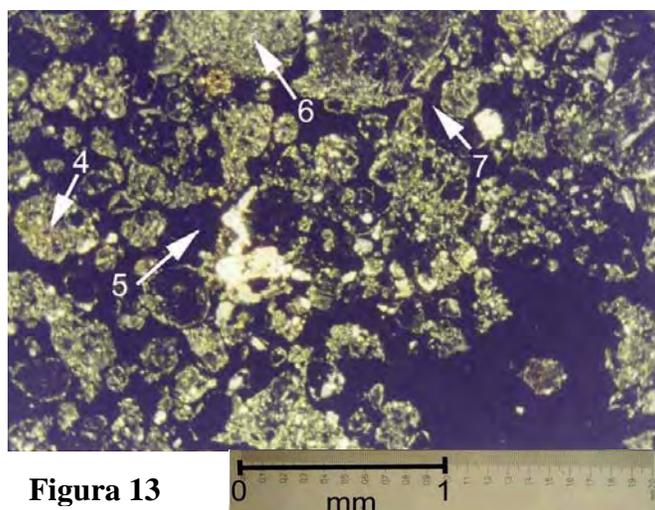


Figura 13

Fig. 13. Micromorfología del suelo (secciones delgadas de suelo) con *Leucaena esculenta*; **4=** agregados redondeados **5=** Poros; **6=** Agregados subredondeados; **7=** Canales de Raíces.

Después del experimento se analizaron el Carbono, Nitrógeno total y la relación C:N de los suelos de acuerdo al tamaño de fracción de los agregados y se encontraron diferencias significativas en el porcentaje de C total a los 32 días de incubación; respecto a los porcentajes de N y la relación C:N, no se encontraron diferencias significativas como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Carbono, Nitrógeno total y la relación C:N de los suelos de acuerdo al tamaño de fracción a los 32 días de incubación.

Tratamientos	N (%)					C (%)					C:N (%)				
	Fracción														
	2	1	0.5	0.25	<0.25	2	1	0.5	0.25	<0.25	2	1	0.5	0.25	<0.25
<i>L. esculenta</i>	0.16	0.16	0.15	0.17	0.21	2 ^a	1.50 ^a	1.2A	1.2 ^a	1.1 ^a	12.5	9.38	8	7.06	5.2
<i>A. acatlensis</i>	0.28	0.25	0.20	0.16	0.18	1.9 ^a	1.8B	1.7B	1.5B	1.7B	6.79	7.2	8.50	9.4	9.44
<i>L. divaricata</i>	0.16	0.17	0.32	0.35	0.71	1.5B	1.9B	2.8C	2.7C	2.6C	9.38	11.2	8.75	7.71	3.66
Control	0.19	0.20	0.26	0.35	0.52	1.6B	1.8B	2D	2.2D	2.7C	8.42	9.0	7.69	6.29	5.19

Los resultados obtenidos durante el presente trabajo muestran que, de las especies utilizadas en este experimento agroforestal, *L. esculenta* significa un gran potencial para este edafosistema por su capacidad de restaurar y conservar el suelo, ya que mantuvo los flujos más altos de CO₂ durante los 32 días de incubación (Figura 12), con respecto a las otras leguminosas utilizadas. Además, se encontró que esta planta produce un buen efecto sobre la agregación del suelo como se observa en la figura 13. Sin embargo, la potencialidad de esta especie se ve opacada por su poco o nulo uso como forrajera en la región; y eso hace que los campesinos no lo consideren tan atractiva.

Sin embargo, es importante hacer notar los estudios que se han realizado en los últimos años en África, acerca de especies se han realizado muchos estudios respecto a especies de leguminosas arbóreas conocidas por ser utilizadas para forraje. De estos destacan los sobre el establecimiento de especies arbóreas forrajeras, aun poco conocidas (Dzowela, *et al*, 1997) donde, para suelos con baja fertilidad, escasas precipitaciones y con ocurrencia de heladas, se demostró la potencialidad de 10 especies altamente forrajeras similares a *Leucaena*, destacando que las de más alto potencial fueron: *L. esculenta*, subs. *paniculata* (es synonymous a *L. pallida*) *L. pulverulenta* y el híbrido interéspecifico de *L. leucocephala* y *L. diversifolia*, mientras que las especies: *L. esculenta* subs. *esculenta* y *L. diversifolia* subsp. *Stenocarp*, resultaron muy prometedoras.

Estos mismos autores también encontraron que los cultivos en franjas y en el contorno de las curvas de nivel, son primariamente establecidos para la conservación del suelo y agua; siendo el punto de entrada para integrar las especies arbóreas la producción de forraje alternando con el cultivo del maíz. En relación a *L. esculenta* subs. *esculenta*, se ha argumentado que probablemente los componentes secundarios de esta planta son los que influyen en la palatabilidad, estos experimentos lo realizaron con plantas de esta especie procedentes de México.

Con respecto a las concentraciones de N en las hojas de esta especie, en el estudio de Nherera, *et al*, (1998) se mencionan valores más altos a los detectados en este trabajo para *L. esculenta*. No obstante, considerando el trabajo de Oorts *et al*, (2000), los resultados de presente trabajo son más altos; sin embargo este autor, al comparar sus resultados, comenta dos aspectos: por un lado, (1) que *Leucaena* puede tener un material más lábil para la descomposición y liberación de nutrimentos y (2), al comparar los valores existentes sobre la composición química de las hojas de *Leucaena*, difiere de los resultados anteriormente mencionados de autores como, Palm *et al*, (2001); argumentando que, en estos trabajos, las hojas recolectadas fueron cortadas en fresco, mientras que Oorts *et al*,(2000), las obtuvo de la hojarasca (litter) de la superficie del suelo.

Se ha comprobado que la práctica de humedecer el suelo seco promueve la evolución de CO₂ debido a la actividad microbiana (Haney and Franzluebbers, 2008), por lo que la época de lluvias después de la época de secas, es un proceso natural básico para el mejoramiento de las características del suelo o cambios en el mismo; tomando en consideración este aspecto, es decir, la marcada estacionalidad del área de estudio, en este proyecto es que se realizaron dos muestreos en época de secas y de lluvias. Estos autores recomiendan desde simplemente humedecer el suelo, hasta establecer las prácticas agroforestales para incrementar la actividad microbiana y producción de CO₂. Así como también, dejar los residuos en el suelo de los cultivos del maíz, entre otros, demostrando con ello un incremento significativo en la producción de CO₂ del suelo natural (Paul et al., 1999).

Dependiendo de las leguminosas utilizadas en las franjas agroforestales, da como resultado también las diferentes relaciones C:N de cada leguminosa y se ha demostrado que este índice controla la mineralización o evolución de CO₂ (Zhan *et al.*, 2007).

En un experimento con suelo tropical con materia orgánica, Dumale *et al.*, (2008) encontraron que la evolución de CO₂ fue significativamente mayor en el horizonte de suelo superficial de 0 a 5 cm que en el de 5 a 20 cm de profundidad. Para el efecto de la materia orgánica en la generación de carbono orgánico del suelo, el tema es controvertido ya que según Dumale *et al.*, (2008) existen estudios que han demostrado que la adición de materia orgánica no aumenta el carbono orgánico del suelo, mientras otros estudios han demostrado que sí.

Coleman et al. (2002) en un estudio de respiración del suelo en bosques templados de Estados Unidos, encontraron que después de 23 años, la fauna microbiana y las raíces incrementaron más la producción de CO₂ del suelo que los factores abióticos como la temperatura o la humedad del suelo.

6.7 Evaluación de la agregación en suelos por el efecto de algunas leguminosas nativas.

6.8 Agregados

Macromorfología

Los resultados de este apartado iniciarán describiendo el análisis macromorfológico de la fracción suelo para cada una de las muestras representativas para las diferentes especies y el testigo.

Análisis macromorfológico de la fracción suelo

En tabla 4 se observa que en todas las muestras testigos (No AGF) el desarrollo de los agregados tienden a ser débil. En el caso de las muestras de *L. esculenta* el desarrollo de los agregados es de débil a moderado, asimismo para *L. divaricata* y todas las muestras de *A. acatlensis* los agregados muestran un desarrollo moderado.

Tabla 4: Características de los agregados para cada una de las muestras más representativas para las diferentes especies y el testigo.

Especie	Muestra	Características
<i>No AGF*</i>	1	Matriz en que predominan agregados finos (arena muy fina) y gruesos (arena muy gruesa), estos últimos son escasos. Se presentan en la matriz abundantes granos sueltos de naturaleza lítica. Los porcentajes de gravilla que exhibe son menores que los que se presentan en la muestra 2 de <i>L. divaricata</i> .
<i>No AGF</i>	2	Matriz lítica en la que predominan granos sueltos siendo los agregados muy escasos y particularmente de tamaño fino (de arena muy fina). Es un suelo esquelético que muestra altos porcentajes de grava y gravilla.
<i>No AGF</i>	3	En esta muestra domina el grano simple (suelto) y aunque existen algunos agregados finos a muy finos su cantidad es escasa. El suelo presenta una matriz arcillosa en la que se detectaron altos porcentajes de arena fina y muy fina (migajón arcillo arenoso).
<i>No AGF</i>	4	El suelo muestra una matriz con una agregación moderada en la que predominan los tamaños finos a medios. Se observan altos contenidos de arenas muy finas, buena porosidad y abundantes raíces finas. Este horizonte presenta un color similar a un A mollico.
<i>L. divaricata****</i>	2	Dominan agregados de tamaño medio y grueso, aunque todavía existe una fracción significativa de grano simple (suelto) que se caracteriza por presentar abundante gravilla.
<i>L. esculenta**</i>	1	La matriz está constituida aproximadamente en un 50% por agregados con desarrollo débil a moderada, siendo el porcentaje restante representado por granos simples.
<i>L. esculenta</i>	2	Muestra una asociación de agregados y partículas similar a <i>L. esculenta</i> 1, siendo el desarrollo de los agregados débil a moderado. Muestra una matriz arcillosa en donde están incluidos porcentajes significativos de arena y de limo. Se considera con menos desarrollo que <i>L. esculenta</i> 1.
<i>L. esculenta</i>	3	Muestra una matriz lítica en que predomina el grano suelto aunque existen agregados finos. que son friables a muy friables en húmedo así como ligeramente adhesivos y plásticos. De modo similar a las anteriores de <i>L. esculenta</i> 1, 2 y 3, presenta porcentajes significativos de arenas finas y medias y una menor cantidad de limo que las anteriores.
<i>L. esculenta</i>	4	Presenta un porcentaje aproximado del 60% por volumen de agregados finos los cuales muestran un desarrollo débil a moderado, sus contenidos de arena y limos son los más bajos que se han reportados de <i>L. esculenta</i> 1, 2, y 3.
<i>A. acatlensis</i>	1	En esta muestra dominan los agregados finos, de desarrollo moderado. Este horizonte es similar a un horizonte A mollico.
<i>A. acatlensis</i>	2	Abundantes agregados de tamaño finos y muy finos con desarrollo moderado.
<i>A. acatlensis</i>	3	Abundantes agregados de tamaño fino y medio con desarrollo moderado. Se presenta una matriz arcillosa que contiene cantidades significativas de limo y arena muy fina. De modo similar a la anterior presenta características parecidas a un horizonte A mollico.
<i>A. acatlensis</i>	4	Predominan agregados de tamaño fino y moderado con un desarrollo moderado.

Micromorfología y mineralogía de los suelos

La Micromorfología de los suelos Como se cita en los materiales y métodos los análisis de las láminas delgadas se realizaron en un microscopio óptico, regulando la apertura del diafragma con el fin de destacar forma, tamaño y desarrollo. Se consideró deseable observar aquellos agregados que por su forma granular, su tamaño fino a medio y su desarrollo fuerte, además de una consistencia suave a ligeramente dura y friable, se pudieran relacionar con el efecto de las especies de leguminosas de las franjas agroforestales. A continuación se describirán las fotos más representativas.

Foto 7 (No AGF M1)

Aunque el horizonte es muy poroso se caracteriza por presentar agregados muy poco estables, de distribución muy localizada en la matriz de forma subangular en ocasiones irregulares. Muchos de ellos muestran sobre la cara del ped abundantes fragmentos líticos, de forma angular. Este horizonte se caracteriza por una baja actividad biológica.

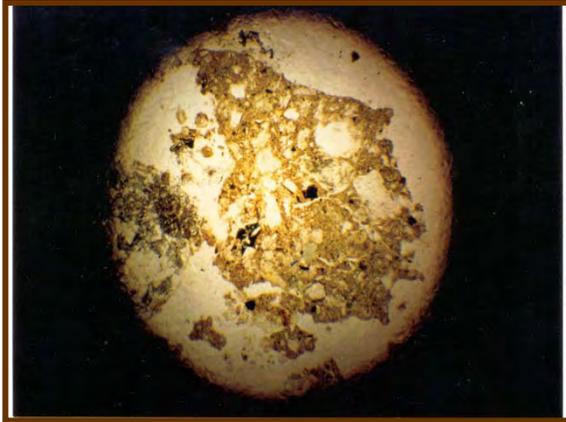


Foto 11 (No AGF M3)

La agregación es muy pobre con estructura deficiente aunque existen poros finos. Las antiguas huellas de raíces están rellenas con limo y restos de fragmentos líticos finos.

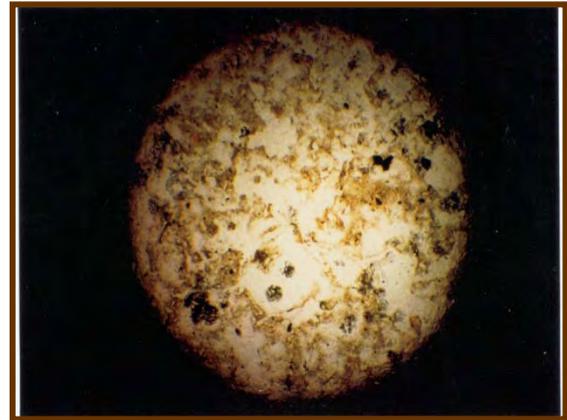


Foto 14 (No AGF M2)

Horizonte formado por fragmentos líticos que muestra una agregación casi nula.



Foto 9 (No AGF M4)

No presenta agregados consecuentemente carece de estructura, está constituido principalmente por granos líticos.



Foto 6 (*L. divaricata* M2)

Este horizonte muestra agregación que le confiere una estructura muy débil esta agregación esta conferida principalmente por la presencia de material orgánico (raíces muy finas). En la matriz del agregado es común observar huellas de raíces.



Foto 16 (*L. esculenta* M2)

Son agregados de forma redondeada a subangular muestran huellas de raíces están rellenas por partículas de limo fragmentos líticos y arcillas. Sobre su superficie presentan cutanes, localizados de materia orgánica.

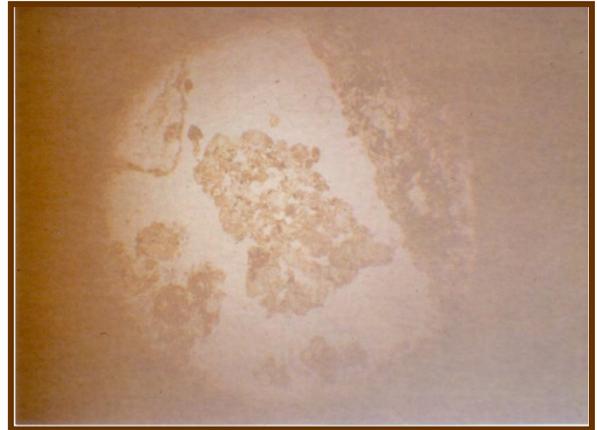


Foto 25 (*L. esculenta* M1)

Agregados redondeados aunque de consistencia débil, tamaño fino que presenta bajo porcentaje de material orgánico. Los fragmentos líticos son abundantes

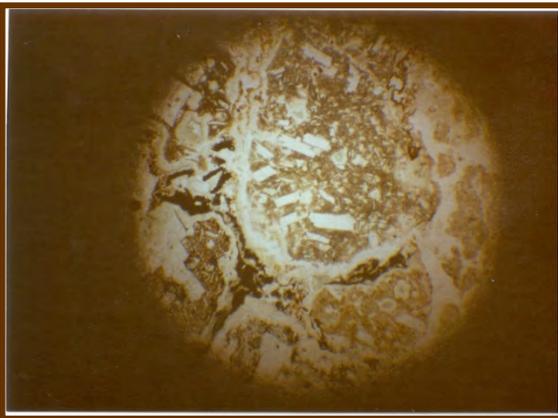


Foto 20 (*L. esculenta* M3)

En este horizonte existen agregados que confieren buena estructura al suelo algunos todavía presentan en sus caras restos de líticos de tamaño fino. Entre ellos se observan agregados pequeños bien estructurados de forma redondeada, asimismo un mayor porcentaje de materiales orgánicos. Estos agregados presentan un mayor desarrollo que los descritos anteriormente esculentas 1 y 2).



Foto 22 (*L. esculenta* M4)

Horizonte cuya estructura está constituida por agregados más estables de forma redondeada que le confieren buena porosidad. En el se observan evidencias de una mayor actividad biológica.



Foto 32 (*A. acatlensis* M2)

Este horizonte muestra una estructura constituida por agregados estables de tamaño grande subredondeados, porosos y con inclusiones de materiales orgánicos. La estructura tiende a ser predominantemente de forma subangular.

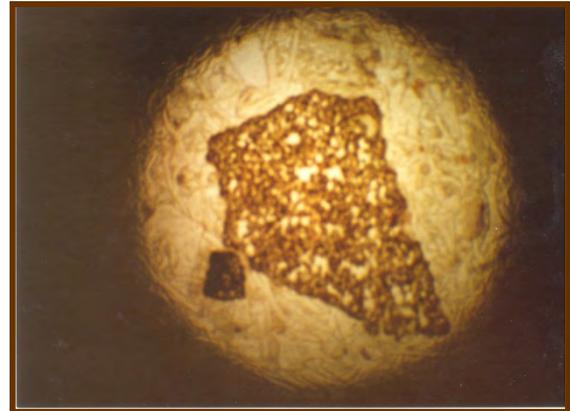


Foto 34 (*A. acatlensis* M1)

Horizonte constituido por una estructura de bloques grandes subangulares y más desarrollados que todos los descritos anteriormente. Los peds muestran en sus caras fragmentos líticos finos, huellas de raíces aunque menor porcentaje de materiales orgánicos.



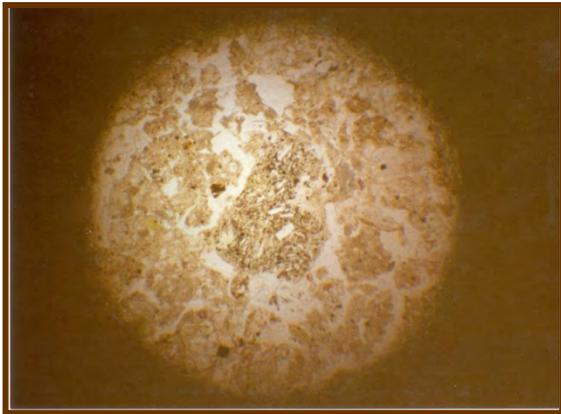
Foto 29 (*A. acatlensis* M3)

En este horizonte los agregados son abundantes y presentan formas subangulares, a subredondeadas. Su desarrollo oscila de débil a moderado y se presentan abundantes restos de material orgánico.



Foto 26 (*A. acatlensis* M4)

Es un horizonte que muestra buena agregación aunque existen granos sueltos. Los agregados presentan formas subangulares y tamaño fino. Se estima que su formación puede ser correlacionada con el efecto directo de esta planta.



Mineralogía de los suelos

Respecto a la mineralogía de los suelos a continuación se describirán los resultados obtenidos en el presente trabajo, primeramente en la tabla 5 vinculando la micromorfología y mineralogía, después se describirán las fotos más representativas mostrando la mineralogía de los suelos estudiados en el mismo.

Tabla 5. Micromorfología y mineralogía

Especie	Muestra	Características
<i>No AGF*</i>	1 Noviembre	Se observan fragmentos de tobas y de otros materiales volcánicos, rico en plagioclasas con mucha alteración. Los minerales ferriomagnesianos están alterados y forman óxidos de hierro. También se encontraron calcitas (CaCO ₃). El material lítico predomina sobre los agregados (fotos 2 a 4).
<i>No AGF*</i>	1 Abril	El material se ve más limpio, las zonas de alteración son más pequeñas, hay acumulación de CaCO ₃ más que en la muestra de noviembre. Se observan poros muy grandes, muchos canales de conexión entre los fragmentos de la muestra, hay fragmentos de todos los tamaños tanto en las otras rocas volcánicas como en las tobas (foto 6).
<i>L. divaricata</i>	4 Noviembre	Existen muchos fragmentos de rocas de diferentes tamaños, hay fragmentos de restos orgánicos.
<i>L. divaricata</i>	4 Abril	Hay partes con grandes fragmentos de rocas, sobre todo de tobas, muy porosos.
<i>L. esculenta</i>	4 Noviembre	Material fragmentado, hay formación de CaCO ₃ , hay disolución y recristalización de sílice, hay muchos óxidos de hierro que indican humedad estacional.
<i>L. esculenta</i>	4 Abril	Hay más CaCO ₃ , no se observa la recristalización de Sílice como la muestra anterior, hay fragmentos de muy diferentes tamaños.
<i>A. acatlensis</i>	4 Noviembre	Es un material que se está disolviendo y se va a fragmentar fácilmente, dando una buena estructura y aireación. Existe más homogeneidad en los tamaños de agregados y líticos, no se ve acumulación de Ca y abundan los óxidos de hierro.
<i>A. acatlensis</i>	4 Abril	Se observan fragmentos grandes de líticos, los minerales no están muy alterados, y hay acumulación de CaCO ₃ .

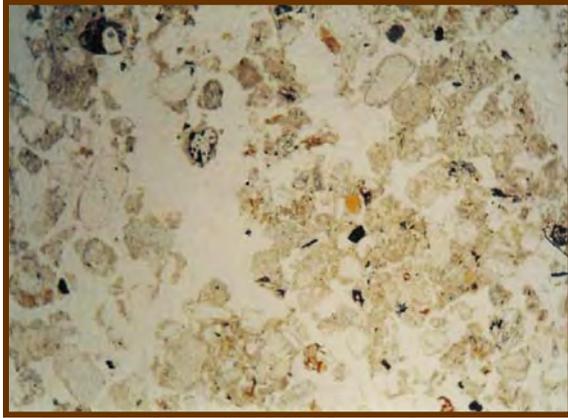


Foto 2a (No AGF M1 Noviembre).

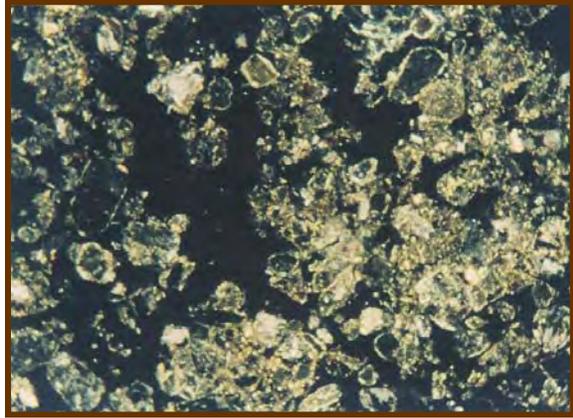


Foto 2b (No AGF M1 Noviembre).

En las fotomicrografías 2a (No AGF M1 Noviembre) y 2b, se observa tanto con luz natural y como con luz polarizada, fragmentos de material parental como pequeños pseudoagregados (Tabla de mineralogía).

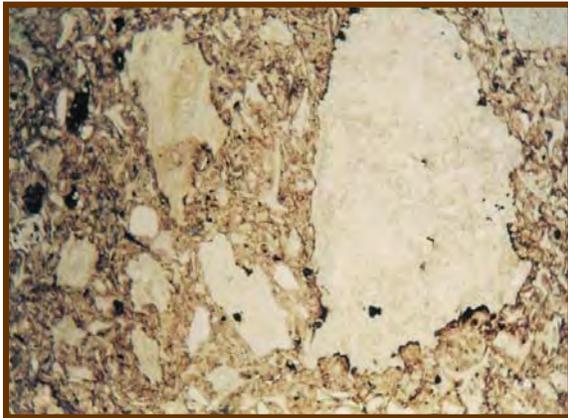


Foto 4a (No AGF M1 Noviembre).



Foto 4b (No AGF M1 Noviembre).

Las fotomicrografías 4a y 4b al observarse tanto en luz natural y en luz polarizada, un fragmento de toba rellenos con CaCO_3 .

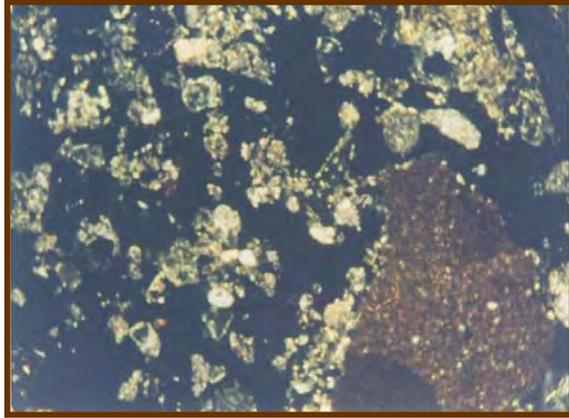


Foto 6 (No AGF M1 Abril).

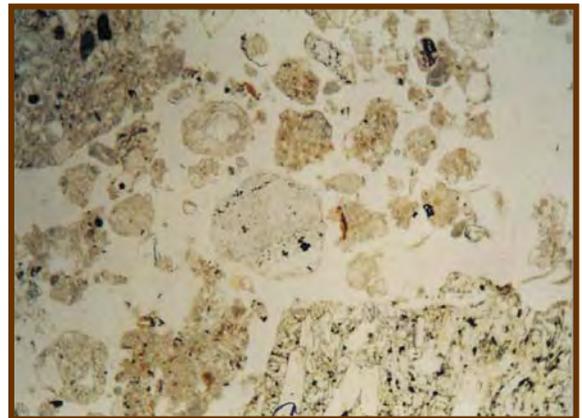


Foto 7 (*L. esculenta* M4 Noviembre).

La fotomicrografía 6 al observarse tanto con luz polarizada, se distingue fragmentos de toba y pequeños fragmentos donde se observan los diferentes tamaños de partículas.

En la fotomicrografía 7 con luz natural se denota un fragmento grande combinado con fragmentos pequeños y no hay muchos agregados en esta foto.

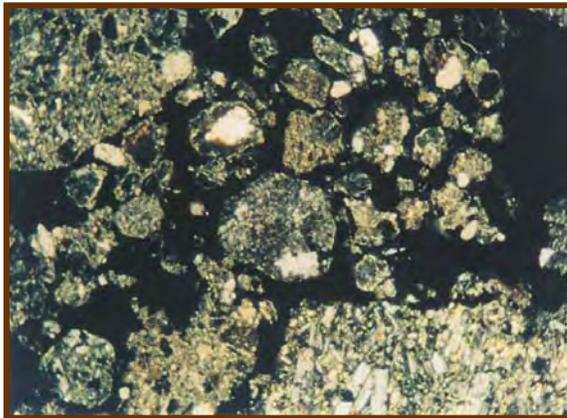


Foto 8 (*L. esculenta* M4 Noviembre). Luz polarizada. Fragmentos grandes combinado con fragmentos pequeños no hay muchos agregados en esta foto.

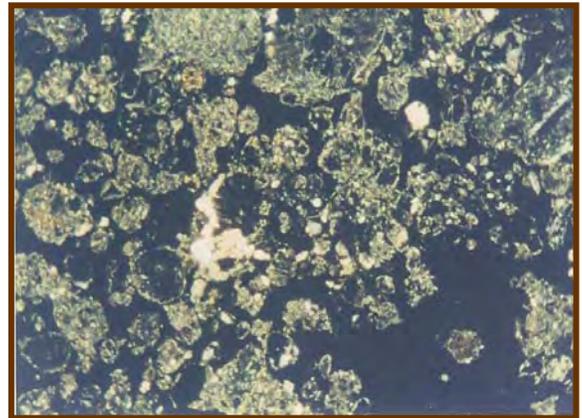


Foto 9 *L. esculenta* M4 (Noviembre). Luz polarizada. Se observa otra parte de la lámina la heterogeneidad en los tamaños de los fragmentos agregados (Hay fragmentos pequeños; pero no tan pequeños).

La fotomicrografía 8 con luz polarizada se observa otra parte de la lámina la heterogeneidad en los tamaños de los fragmentos agregados (Hay fragmentos pequeños; pero no tan pequeños).



Foto 10a (*L. esculenta* M4 Abril)



Foto 10b (*L. esculenta* M4 Abril) Luz

Las fotomicrografías 10 a y 10b con luz natural y luz polarizada muestran la heterogeneidad del tamaño (Hay fragmentos pequeños; pero no tan pequeños como la muestra anterior).

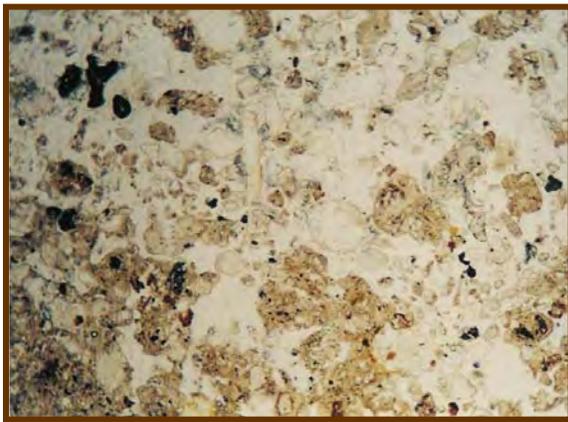


Foto 12a (*A. acatlensis* M4 Noviembre)

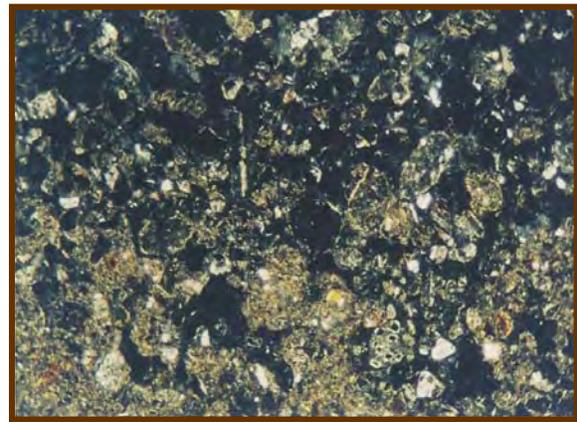


Foto 12b (*A. acatlensis* M4 noviembre).

Par el caso de las fotomicrografías 12a y 12b al observarse con luz natural y luz polarizada pareciera que todos son agregados y son parte de la masa inicial.

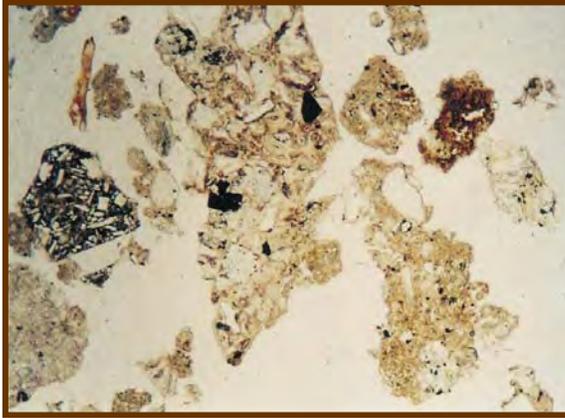


Foto 14a (*A. acatlensis* M4 Abril)
tamaños.



Foto 15b (*A. acatlensis* M4 Abril)

Al observarse con luz natural y luz polarizada las fotomicrografías 14 a y 14b se observan pedazos de fragmentos de rocas de diferentes tamaños.

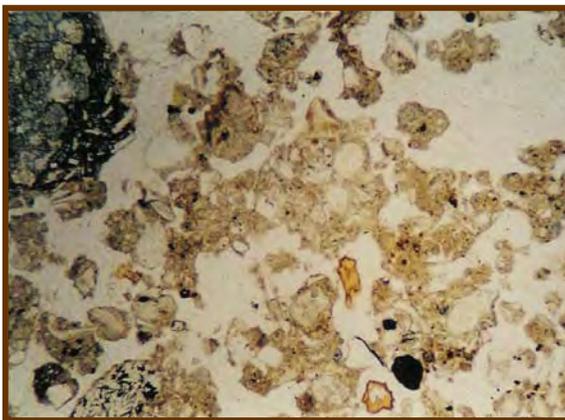


Foto 16a (*L. divaricata* M4 Noviembre)

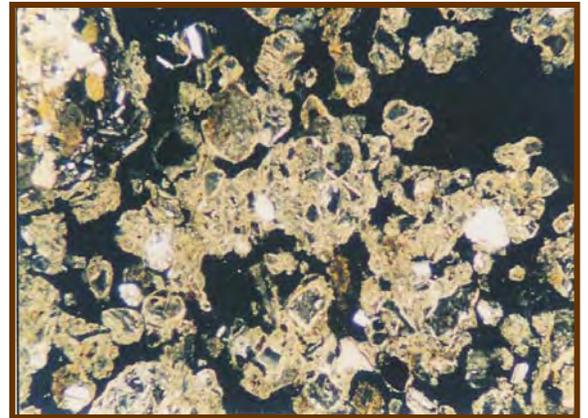


Foto 16b (*L. divaricata* M4 Noviembre).

Las fotomicrografías 16a y 16b al observarse a través de la luz natural y la luz polarizada encontramos agregados de diferentes tamaños, pero tienen un desarrollo homogéneo.

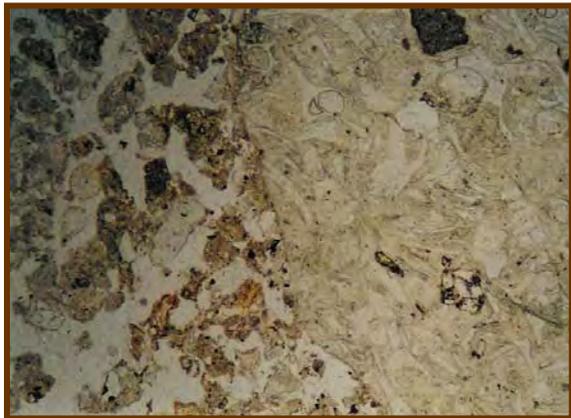


Foto 18a (*L. divaricata* M4 Noviembre)

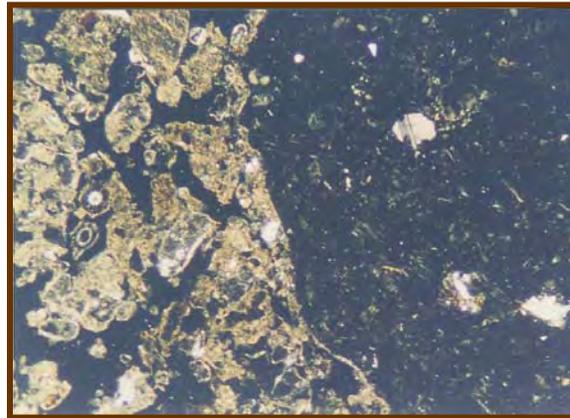


Foto 18b (*L. divaricata* M4 Noviembre)

Al observar las micrografías 18a 18b al observarse mediante luz natural y luz polarizada se distinguen fragmento grande con pequeño (para ver la heterogeneidad).

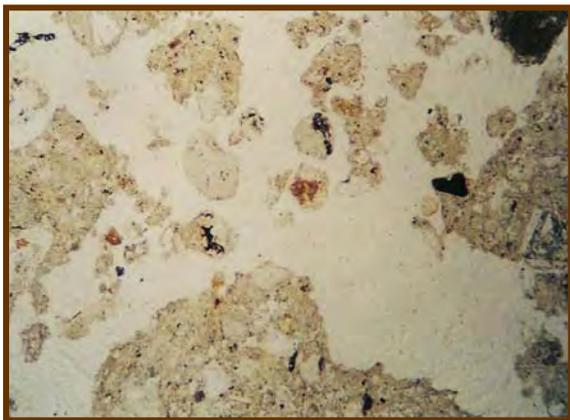


Foto 20a (*L. divaricata* M4 Abril)

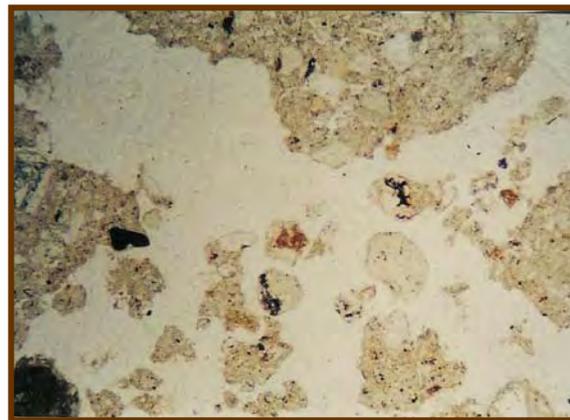


Foto 20b (*L. divaricata* M4 Abril).

Al observarse las micrografías 20a y 20b en luz natural y luz polarizada se ven los fragmentos de rocas grandes y material pequeño no agregado.

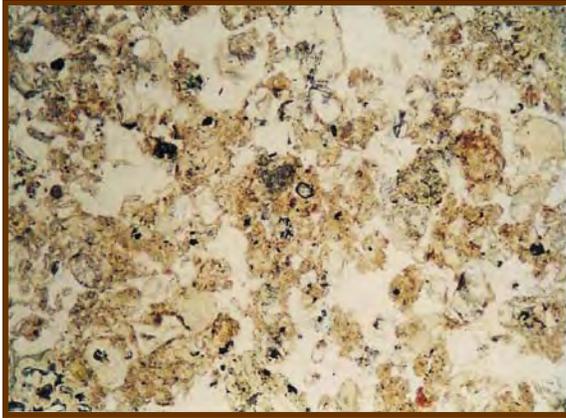


Foto 22a (*A. acatlensis* M4 Noviembre)

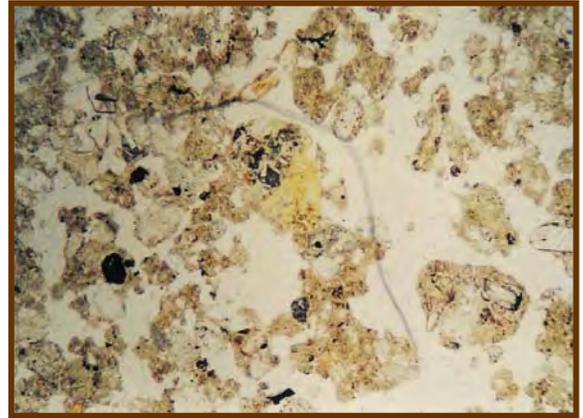


Foto 22b (*L. divaricata* M4 Noviembre).

En el caso de las micrografías 22a y 22b con luz natural y luz polarizada se observan agregados.

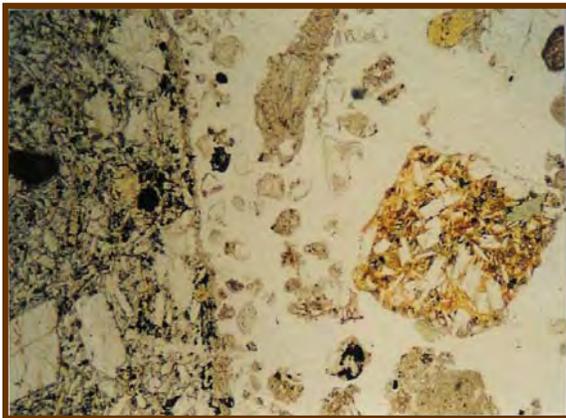


Foto 24 (No AGF M4 Noviembre)

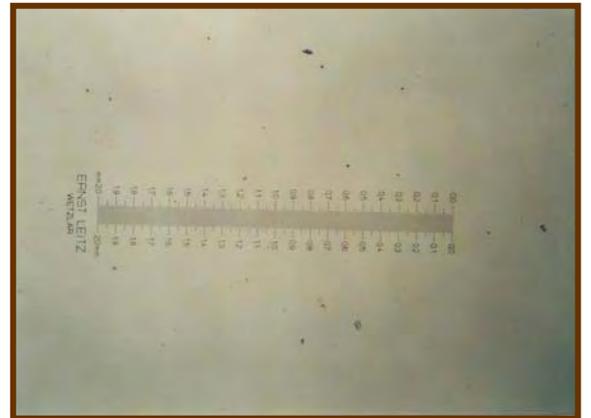


Foto regla

En la micrografía 24 al observarse mediante luz natural se observa poca agregación.

En síntesis, con estas micrografías se puede representar como un tiempo “cero” en la formación de agregados, estos como se observan están constituidos principalmente por líticos, terrones, pseudoagregados, generalmente de matriz de arcilla, pero se observa además el efecto de las especies utilizadas que como ya se ha descrito destacan *Leucaena esculenta*, *Acacia acatlensis* y *Lysiloma divaricata*. Sin embargo para llevar una evaluación correcta se debe darle seguimiento por un periodo a corto tiempo por 10 años (short time) para evaluar la acción de la agregación de las especies.

6.10 Dinámica de la formación de agregados

Observaciones cualitativas

Los resultados de las observaciones, de manera cualitativa como son la consistencia, plasticidad y adherencia mismas que se interpretaron de acuerdo a lo propuesto por USDA- SSS (1990), se muestran en la tabla 6 en la cual se pueden observar las características morfodinámicas de los agregados para cada una de las muestras más representativas para las diferentes especies y el testigo.

Tabla 6: Morfología y dinámica cualitativa de los agregados

Especie	Muestra	Características
<i>No AGF*</i>	1	La consistencia en seco es ligeramente dura y en húmedo moderadamente adhesiva y plástica, friable en húmedo
<i>No AGF</i>	2	Muy friable en húmedo
<i>No AGF</i>	3	La consistencia en seco varía de ligeramente dura a blanda. La consistencia en húmedo es muy friable aunque adhesiva y moderadamente plástica.
<i>No AGF</i>	4	La consistencia en seco varía de dura a muy dura, siendo muy friable en húmedo. Es ligeramente adhesiva no plástica.
<i>L. divaricata***</i>	2	La consistencia en seco varía de dura a moderadamente dura, siendo friable en húmedo. Su plasticidad y adhesividad son moderadas.
<i>L. esculenta**</i>	1	La consistencia en seco es ligeramente dura siendo friable en húmedo adhesiva y plástica.
<i>L. esculenta</i>	2	La consistencia en seco es blanda y en húmedo muy friable y plástica. Se considera con menos desarrollo que <i>L. esculenta</i> 1.
<i>L. esculenta</i>	3	Muestra una matriz lítica en que predomina el grano suelto aunque existen agregados finos que son friables a muy friables en húmedo así como ligeramente adhesivos y plásticos.
<i>L. esculenta</i>	4	La consistencia en húmedo es friable siendo moderadamente adhesiva y plástica
<i>A. acatlensis</i>	1	Su consistencia en seco varía de ligeramente dura a dura. En húmedo es muy friable moderadamente adhesivo y plástica.
<i>A. acatlensis</i>	2	Su consistencia es blanda a ligeramente dura. Su consistencia en húmedo es friable y moderadamente adhesiva y plástica.
<i>A. acatlensis</i>	3	En húmedo es adhesiva y plástica.
<i>A. acatlensis</i>	4	Su consistencia varía de blanda a ligeramente dura en seco, en húmedo es moderadamente adhesiva, plástica y friable.

Referente a los resultados obtenidos en la evaluación cualitativa de los agregados a la resistencia al agua y su importancia radica, dado que en un agregado no solamente es importante observar su forma, tamaño y grado de desarrollo sino también que tan resistentes son a la erosión por agua, que se puede probar en este tipo de análisis. Los resultados en esta parte muestran consistentemente a la observación al microscopio de los agregados, que el suelo bajo *A. acatlensis* tiende a formar agregados de resistencia excelente para todas las muestras (M1=75%, M2=80%, M3=90% y M4=80%). Para todas las muestras con la especie *L. esculenta* esta resistencia fue de buena a excelente (entre 70 y 80%), La muestra de *L. divaricata* mostró una resistencia buena (70%). Para las muestras testigos (No AGF) La muestra 3 es la única que se puede

evaluar como excelente (80%), mientras que para las otras muestras van desde satisfactorio a bueno (Muestras 1, 2 y 4 respectivamente).

Cuantificación de la agregación en seco

Los resultados del análisis de los agregados en seco por el método de Savvinov (citado en Kaúrichev *et al* 1980) se observan en la tabla 7, el conjunto de las cuatro muestras por tratamiento (*L. esculenta*, *A. acatlensis* y *L. divaricata*) y el testigo (No AGF) ninguno alcanza un valor homogéneo calificable de excelente, sin embargo. Algunas muestras por separado en cada tratamiento alcanzan el valor de excelente como sigue: No AGF8 (M2 y M3), para *L. esculenta* las muestras 3 y 4, para *L. divaricata* la muestra 4 y por último para *A. acatlensis* las muestras 1 y 4. Las muestras del testigo (No AGF), todas van del rango de excelente a bueno. Para las otras muestras de *L. esculenta* y *L. divaricata* se observa el estado estructural de excelente a bueno. A excepción de la muestra 3 de *A. acatlensis* que se encuentra en el valor de satisfactorio, las otras van de bueno a excelente.

Tabla 7: En esta tabla se observa el porcentaje de agregación en seco para cada una de las diferentes muestras

Tamaño de los agregados mm	NO AGF				<i>L. esculenta</i>				<i>L. divaricata</i>				<i>A. acatlensis</i>			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
8	0	0	0	0	1.1	0	0	0	0	2.5	0	1.2	6.1	3.5	3	4.1
4	0	0	0	0	4.4	0	3	2.8	5.7	2.9	0	5.8	8.5	10.8	3.7	7.2
2.8	0	0	0	0	3.4	2.6	3.2	3.8	8.6	4.4	3.2	6.2	6.4	4.4	3.8	3.9
2	6	9	10.1	0	4	3.4	7.6	8.4	2.7	5	2	4.7	8.3	5.4	6.75	5.2
1	14	17.8	17	20.4	14.3	11.9	18.6	26.8	17.3	10.1	19.2	19.3	12.9	11.9	11.4	15
0.5	15.5	16.3	18.1	23.3	11.2	21.8	27.3	24.7	13.9	15.5	21.1	14.6	21.6	15.9	12.1	18.1
0.25	23.3	20	19.3	17	12.8	20.7	23.2	14.5	8.6	12.4	14.5	20.8	13.2	15.1	8.7	16.8
<0.25	19.4	20.5	21	11	9.4	13.4	10	8.4	6.7	13.5	10.6	16.9	12	11.5	7.5	11.2
% de agrega.*	78.2	83.6	85.5	71.7	60.6	73.8	92.9	89.4	63.5	66.3	70.6	89.5	89	78.5	56.95	81.5

*El % de agregación total es en porcentaje de la masa del suelo secado al aire y la interpretación muestra el estado estructural del suelo de la siguiente manera: > 80% es excelente, 80-60 bueno, 60-40 satisfactorio, 40-20 no satisfactorio y < 20% es malo.

Testigo mostraron agregados con características físicas más deseables que las especies utilizadas; sin embargo lo importante de observar es que el número de agregados fue el que se incrementó notablemente con las plantas experimentales, esperando que a través del tiempo también incrementen la calidad de los agregados.

En cuanto al análisis cuantitativo de la resistencia al agua, todas las muestras del suelo bajo *Acacia acatzensis* tienden a formar agregados de calidad excelente, *L. esculenta* de buena a excelente, *L. divaricata* es buena, el No AGF va de bueno a satisfactorio.

Estabilidad de la agregación

De acuerdo con Siebe (1996) la estabilidad de los agregados determina dos situaciones: la penetrabilidad de las raíces y la resistencia a la destrucción y consecuentemente su erosionabilidad por viento y agua, y lo que se evaluó de manera cualitativa el grado de descomposición de los agregados de acuerdo a la relación de la siguiente tabla 8.

Tabla 8. Interpretación del grado de descomposición de los agregados.

Grado de descomposición (*disgregación)	Evaluación	Valores
No hay descomposición o solo fragmentos grandes	Muy alta	1
Dominan los fragmentos grandes sobre los pequeños	Alta	2
Igual número de fragmentos grandes y pequeños	Mediana	3
Dominan los fragmentos pequeños sobre los grandes	Moderada	4
Sólo fragmentos pequeños y turbidez notable del agua	Baja	5
Descomposición total y alta turbidez del agua	Muy baja	6

A partir de esta interpretación los resultados de la estabilidad de los agregados se muestran en la Tabla 9. Posteriormente a los resultados obtenidos se practicó análisis estadístico.

Tabla 9: En esta tabla los valores obtenidos en la estabilidad de los agregados para cada una de las muestras antes y después del experimento de evolución de CO₂.

Muestras	Antes del experimento de CO ₂	Después del Experimento de CO ₂		
		8	16	32
<i>L. esculenta</i> M1	4	4	4	3
<i>L. esculenta</i> M2	4	4	4	2
<i>L. esculenta</i> M3	4	3	3	3
<i>L. esculenta</i> M4	4	3	3	3
<i>A. acatzensis</i> M1	4	4	4	3
<i>A. acatzensis</i> M2	4	4	4	3
<i>A. acatzensis</i> M3	4	2	3	2
<i>A. acatzensis</i> M4	4	3	3	2
<i>L. divaricata</i> M1	3	3	3	2
<i>L. divaricata</i> M2	4	3	3	2
<i>L. divaricata</i> M3	4	3	3	3
<i>L. divaricata</i> M4	4	3	3	2
No AGF M1	5	4	3	2
No AGF M2	5	5	5	5
No AGF M3	5	5	4	4
No AGF M4	5	5	5	5

Se encontró un valor de r: 0.339 y r²: 11.53 entre la estabilidad de los agregados vs C total, es decir, no existe una relación directa entre la estabilidad de los agregados y el C total acumulado a los 32 días de

incubación. Sin embargo es necesario aclarar que el análisis estadísticos resulto muy útil para la interpretación, pero en este caso no refleja la realidad de campo, ya que los valores obtenidos en la estabilidad de los agregados para cada una de las muestras antes y después del experimento de evolución de CO₂, están reflejando una condición estadística no de calidad de suelos.

A partir de los resultados obtenidos desde el punto de vista de mineralogía se puede determinar que en general *L. esculenta* y *A. acatlensis* son similares en el material parental; mientras que *L. divaricata* y el testigo (No AGF) son parecidas entre sí. Sin embargo, la composición de todas las muestras presenta ciertas similitudes.

Por otra parte, se observa la casi total falta de agregación y la presencia de granos minerales sueltos, muy erodables, constituidos por piroclásticos, líticos y minerales félsicos. En contraste, para *L. esculenta*, *A. acatlensis* y *L. divaricata* muestran un efecto claro en la cantidad de agregación del suelo. Los análisis de laboratorio realizados con relación a su estabilidad muestran incrementos que pueden representarse del siguiente modo $1D > 1C > 1B > 1A$. Como se puede observar en la Figura 1, la mayoría de los agregados constituidos se caracterizaban por ser muy redondeados y subredondeados con alta densidad de porosidad, lo cual permite según Mapa y Gunasena, (1995) además de una disminución en la erodabilidad del suelo, un incremento en el paso del agua y aire así como el desarrollo de las raíces.

Finalmente, el efecto en la estructura y agregación del suelo partiendo de los estudios de microscopía, demostraron el efecto de restauración que las especies seleccionadas le confirieron a estos suelos a través de incrementar el número de agregados como se presenta el suelo control (No AGF).

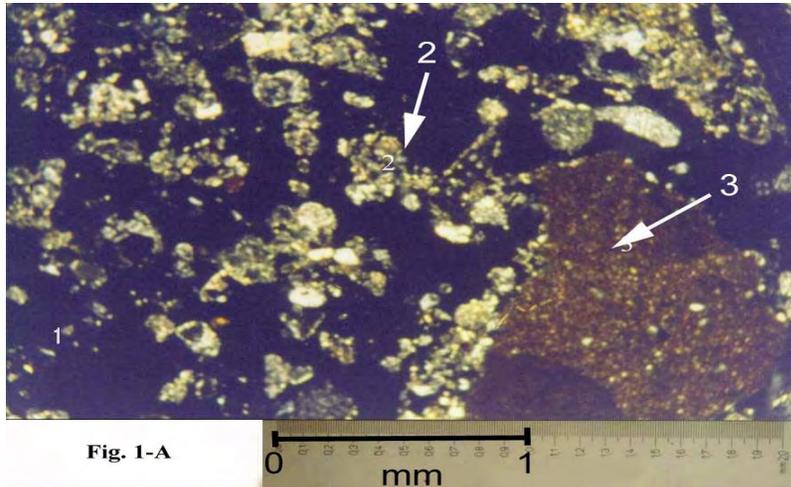


Fig. 1-A

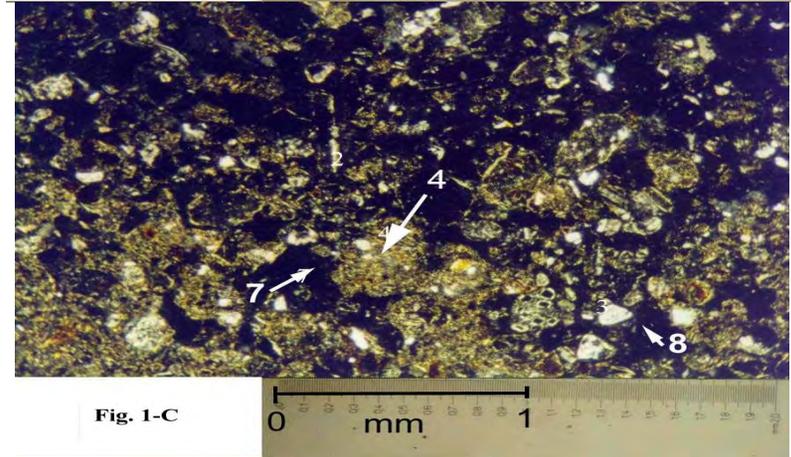


Fig. 1-C

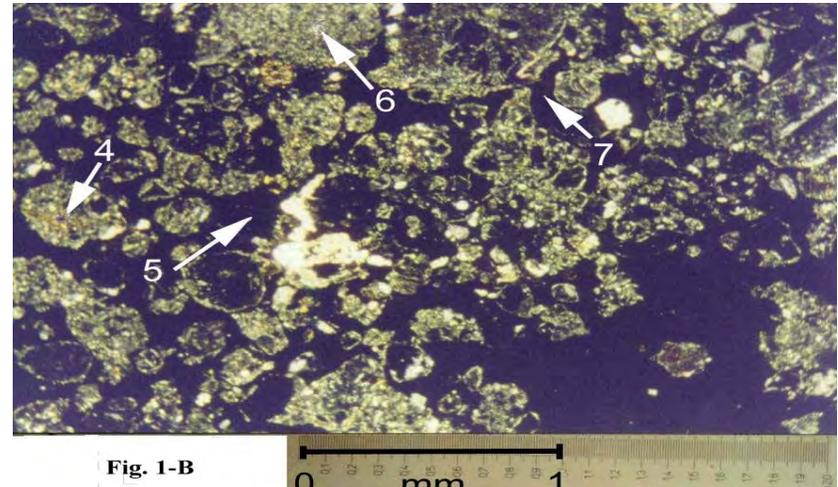


Fig. 1-B

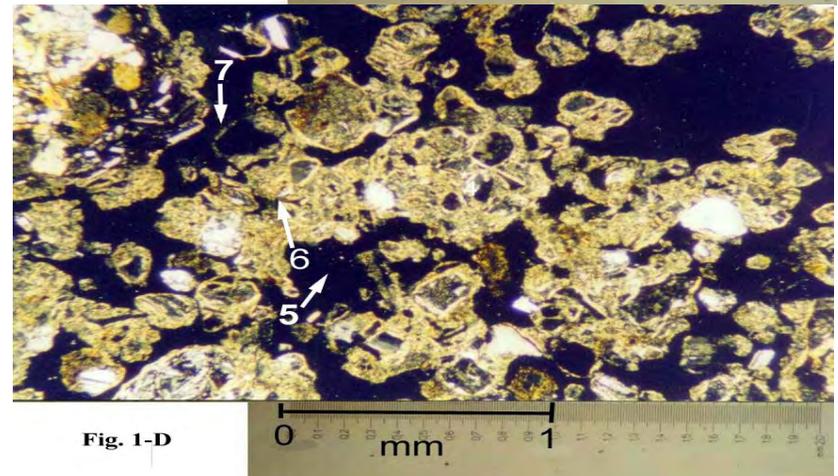


Fig. 1-D

Fig. 1. Micromorfología del suelo (secciones delgadas de suelo). 1-A (Suelo control = Sistema No Agroforestal) predominan partículas sueltas; 2= partículas de vidrio; 3= Líticos; 1-B (*Leucaena esculenta*); 4= agregados redondeados 5= Poros; 6= Agregados subredondeados;

7= Canales de Raíces; 1-C (*Acacia acatensis*); 2= Partículas de vidrio; 3= Fragmentos líticos 4= Agregados redondeados; 7= Canales de raíces. 1-D (*Lysiloma divaricata*); 4= Agregados redondeados; 5= Poros; 6= Agregados subredondeados 7= Canales de raíces.

7. CONCLUSIONES

- Los suelos del área de estudio se caracterizaron por ser suelos minerales, sin desarrollo de perfil, con excepción de un epipedón del tipo A mollico antrópico; son someros, gravosos y con fuerte antropización. Su principal limitante es su relieve (geoforma) con pendientes muy pronunciadas. Los valores de la relación limo/arcilla son indicativos de un bajo desarrollo edafogénico. Con base en la World Resources Base (WRB, 1998) estos suelos se clasifican como Leptosoles eutrícos y mollicos y Regosoles antrópicos.
- Respecto a las propiedades físicas y químicas, se encontró una gran variabilidad en el pH (de 4.95 a 8.0), baja retención de humedad y alta evaporación, atribuibles a las condiciones de sitio (la naturaleza variable del material parental y la microtopografía). Se trata de suelos pobres en bases que requieren la aplicación de abonos orgánicos o de fertilización. Particularmente la relación Ca^{++}/Mg^{++} muestra deficiencias significativas de Mg^{++} . Los valores altos de CICT le confieren cierto potencial de fertilidad natural; no obstante, desde el punto de vista agrícola, una de sus limitantes más importantes son los contenidos de materia orgánica (que oscilan de muy bajos a valores medios), tanto en época seca como húmeda. Los valores más bajos de MO tienden a presentarse en aquellos sitios desprovistos de vegetación.
- Con base en el objetivo general planteado en la presente tesis, el establecimiento de un sistema agroforestal, basado en el establecimiento de tres leguminosas nativas (*Leucaena esculenta*, *Acacia acatlensis* y *Lysiloma divaricata*), para propiciar la restauración y conservación, permitió concluir lo siguiente:
- El comportamiento de cada uno de los tratamientos en función de la evolución del CO_2 , como método para evaluar la actividad microbiana bajo el sistema agroforestal establecido, dió diferencias estadísticamente significativas y permitió concluir que la mayor cantidad de CO_2 evolucionado se obtuvo con *L. esculenta* mientras que el nivel más bajo se produjo en el testigo. En general, las especies de leguminosas establecidas en el experimento produjeron una buena evolución de CO_2 .
- La composición química del follaje de las tres leguminosas reveló una baja relación C:N, lo que significa niveles altos de mineralización de la M.O; el contenido de N total detectado en las plantas fue alto comparados con otras especies de leguminosas, lo que se traduce en un mejor balance de nutrientes para el suelo; sin embargo, en estas variables no se encontraron diferencias significativas entre las tres especies de leguminosas.
- Con base al estudio micromorfológico fue posible evaluar que: (1) en el suelo testigo (no agroforestal) los agregados fueron débiles; (2) en el suelo con *L. esculenta* se desarrollaron agregados de débiles a moderados y (3) en los suelos con *L. divaricata* y *A. acatlensis* los agregados mostraron una resistencia moderada. Aunque el testigo mostró agregados con características físicas buenas, fue más importante el hecho de que el número de agregados se incrementó notablemente en las parcelas con las plantas experimentales, por lo que se espera que, a través del tiempo, también se incremente la calidad de los agregados.
- La presencia de hojarasca en el suelo siempre propició una mayor agregación; sin embargo, fueron las especies utilizadas las que determinaron en cada caso la calidad de los agregados.

- A partir del cuestionamiento inicial de esta tesis referente a las propuestas de restauración del suelo aplicables a suelos como los de la Montaña de Guerrero objeto de este estudio, se concluye que la formación de agregados, la cantidad y su calidad, medidos a través de su resistencia en seco y en húmedo, es un indicador de la restauración de este tipo de suelos.
- Por las condiciones edafoclimáticas, los rendimientos de maíz en la zona de estudio son bajos. Durante el primer año del experimento, se esperaba difícil mejorar los rendimientos; por lo que no hubo diferencias estadísticamente significativas entre el testigo y las parcelas con sistema agroforestal, fluctuando entre 503 y 593 Kg/ha; sin embargo, el diseño experimental si permitió obtener efectos positivos en la restauración y conservación del suelo.
- Finalmente, sobre la productividad del suelo es posible que a futuro, la inoculación de las leguminosas con rizobios seleccionados por su efectividad para fijar el N₂ del aire y, por tanto, que aporten una mayor cantidad de nitrógeno al suelo, mejoraría los rendimientos de maíz o de cualquier otro cultivo integrado al sistema agroforestal.

8. LITERATURA CITADA

1. Aguilera, C.M. y Martínez, E.R. 1986. Relaciones agua-suelo-planta-atmósfera. UACH. Chapingo, Méx. 321 pp.
2. Aguilera, G.L.I. 1986. Estudio sobre la nodulación de las leguminosas silvestres de la Mixteca Oaxaqueña. Tesis profesional, Facultad de Ciencias, UNAM. 83 pp.
3. Anderson, J.M. and Ingram, J.S.I. 1996. Tropical soil Biology and Fertility: A Handbook of Methods. 2 ed Cab International UK.
4. Aquihuatl, A. and Muñoz. D. 1983. Inoculation of *Leucaena leucocephala* with *Rhizobium* strain adapted at high level of aluminium. *Leucaena Research Reports* Vol 4. 54 pp.
5. Arriaga, V. 1991. Fenología de 12 especies de la Montaña de Guerrero, México: Elementos para su manejo en una comunidad campesina. Tesis Profesional. Facultad de Ciencias, UNAM, México. 95 pp.
6. Arriaga, V., V. Cervantes y A. Vargas-Mena. 1994. Manual de reforestación con especies nativas. INE- SEDESOL-UNAM. México. 219 pp.
7. Banco de México, S.A. 1980. *Leucaena* (Huaje). Leguminosa tropical mexicana, usos y potencial, FIRA. XXV Aniversario. 89 pp.
8. Besnar, E., C., Chenu, J. Balesdent, P. Puget and D. Arrouys. 1996. Fate of particulate organic matter in soil aggregates during cultivation. *European Journal of Soil Science*. 47(4):495-503.
9. Beuge, D.M. 1977. Cassava interplanted with Giant ipil-ipil: A means of providing an inexpensive source of fertilizer and reducing erosion. USA. I.D. Manila Philippines.
10. Boyoucos, G.J. 1963. Hydrometer method improved Formakin particule size analysis of soil. *Agronomy Journal* 54:435-438.
11. Bremner, J.M. 1960. Determination of nitrogen in soil by Kjeldhal method. *Journal of Agriculture Science* 55:11.
12. Bullock, P.N., Fédoroff N., Jongerius A., Stoops G., and Tursina, T. 1985. Handbook for Soil Thin Section Description. Wayne Research Pub., Albrington, England.
13. Byard R.L., Kristin C. and Montagnini F, 1996. Leaf litter decomposition and mulch performance from mixed and monospecific plantations of native tree species in Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 58 (2-3): 145-155.
14. Casas, A. 1992. Etnobotánica y procesos de domesticación en *Leucaena esculenta* (Moc. Et Sessé ex A.D.C.) Benth. Tesis (Maestría en Ciencias). Facultad de Ciencias. UNAM. México, D. F. 222 pp.

15. Casas, A. y J. Caballero. 1996. Traditional management and morphological variation in *Leucaena esculenta* (Fabaceae: Mimosoideae) in the Mixtec region of Guerrero, México. *Economic Botanic*. 50(2):167-181.
16. Cervantes, V. 1996a. La Reforestación en la Montaña de Guerrero: Una estrategia alternativa con leguminosas nativas. Tesis (Maestría en Ciencias). Facultad de Ciencias. UNAM. México, D.F. 126 pp.
17. Cervantes, V. 1996b. Restauración ambiental en San Nicolás Zoyatlán, Montaña de Guerrero. *Gestión de Recursos Naturales*. 3: 8-13.
18. Cervantes, V. J. Carabias y C. Vazquez-Yanes. 1996. Seed germination of woody legumes from deciduous tropical forest of souther Mexico. *Forest Ecological and Management*. 82:171-184.
19. Cervantes, V., G. Hernández y M. Hernández. 1998. Restauración Ambiental con Especies Nativas para el Uso de los Recursos Forestales de la Selva Baja Caducifolia (Primer Informe Anual). Laboratorio de Ecología. Facultad de Ciencias, UNAM-Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza, A. C. México, D. F.
20. Cervantes, V. 1999. Restauración Ambiental con Especies Nativas para el Uso Sustentable de los Recursos Forestales de la Selva Baja Caducifolia (Informe Final). Laboratorio de Ecología. Facultad de Ciencias, UNAM-Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza, A. C. México, D. F.
21. Cervantes G., V. M. López González, N. Salas Nava y G. Hernández. 2001. Técnicas para propagar especies nativas de selva baja caducifolia y Criterios para establecer áreas de reforestación. UNAM-SEMARNAP. 174p
22. Cervantes, V. 2005. Un enfoque interdisciplinario para la restauración ambiental: Estudio de caso de una comunidad nahua del Sur de México. Tesis Doctoral en Ciencias (Biología). Facultad de Ciencias. UNAM. México, D.F. 300 pp.
23. Cervantes-Gutiérrez, V., J.E. Gama-Castro, G. Hernández-Cárdenas and J.A. Meave del Castillo, 2005. The Land Classification System of the San Nicolás Zoyatlán (S Mexico) Nahuatl Indigenous Community: A Basis for a Suitable Parametric Soil Use Proposal. *Research in Human Ecology; Human Ecology Review*, 12(1):44-59.
24. Cobbina, J., B.T. Kang and Atta-Krah. 1989. Effect of soil fertility on early growth of *Leucaena* y *Gliricidia* in alley farms. *Agroforestry Systems*. 8(2):157-164.
25. Coleman, D.C., M.D. Hunter, J. Hutton, S. Pomeroy, and L. Swift Jr. 2002. Soil respiration from four aggrading forested watersheds measured over a quarter century. *Forest Ecology and Management* 157 (2002) 247–253.
26. Conacher, A.J., Dalrymple, J.B., 1977. The nine unit land surface model: An approach to pedogeomorphic research: *Geoderma*, 18:1-154
27. Cruz, C.R. 1989. Producción de forraje con especies no convencionales en terrenos degradados del Estado de Morelos. Tesis (Maestría en Ciencias). Facultad de Ciencias, UNAM, México. 161 pp.

28. De Costa, W.A.J.M. & A.M.L.K. Atapattu. 2001. Decomposition and nutrient loss from prunings of different contour hedgerow species in tea plantations in the sloping highlands of Sri Lanka. *Agroforestry Systems* 51: 201-211.
29. Dijkman, M.J. 1950. *Leucaena* a promising soil erosion control plant. *Economic Botanic*. 4:337-349.
30. Dommergues, Y.R., H.G. Diem, D.L. Gauthier, B.L. Dreyfus and F. Cornet. 1983. Nitrogen-Fixing trees in the Tropics: Potentialities and Limitations. In *Advances in Nitrogen Fixation Research : Proceedings of the 5th International Symposium on Nitrogen Fixation*, Noordwijkerhout, The Netherlands, August 28 –September 3, 1983. Pp: 7-13.
31. Doran, J.W, Elliot, E.T. and K. Paustin. 1998. Soil microbial activity, nitrogen cycling and long term changes in carbon organic pools as related to fallow tillage management. *Soil & Tillage Research* 49:3-18.
32. Dumale, W.A., Jr. T. Miyazaki, T. Nishimura and K. Seki, 2008. NVSU Research Journal Vol. XV Nos. 1&2 * Jan. - Dec. 2008.
33. Dzowela B.H, Hove, L. Maasdorp B.V. and P.L. Mafongoya. 1997. Recent work on the establishment, production and utilization of multipurpose trees as a feed resource in Zimbabwe. *Animal feed Science and Technology*.69: 1-15.
34. FAO. 1996. El desarrollo rural sostenible: Progresos y problemas, Cuarto Informe sobre los progresos realizados en la aplicación del programa de acción de la CMRADR, FAO, Roma, Italia
35. Flores, F. and T.H. Stobbs. 1978. Value of legume suplement for lacting cows grazing tropical grass pastures. *Tropical Crops Pastures*. Div. Rpt. CSIRO. Australia 1976-1977. 117 pp.
36. Franzluebbbers A.J., F.M. Hons, D.A. Zuberer. 1998. In situ and potential CO₂ evolution from a Fluventic Ustochrept in southcentral Texas as affected by tillage and cropping intensity. *Soil & Tillage Research* 47:303-308.
37. Gama, C.J.E. 1996. Los Suelos Tropicales de México. I. Génesis, Dinámica y Degradación. Tesis (Doctor en Ciencias). Facultad de Ciencias, UNAM. México. 421 Pp.
38. Gama-Castro, J.E,S. Palacios-Mayorga, M. and Villegas-Soto 1996. Hidroerosión de Suelos de Tepetzingo, Morelos, México. *Revista de Edafología Mexicana* 1: 1-15
39. García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, UNAM. México.
40. García, D.E., H. B. Wencomo, M.G. Medina, P. Moratinos y L.J. Cova. 2009. Caracterización de la calidad nutritiva de 53 accesiones del género *Leucaena* en condiciones tropicales. *Pastos y Forraje* 32 (1): 1-16.
41. Garrity, D.P. 1993. Sustainable land-use systems for sloping uplands in Southeast Asia. *In: Technologies for sustainable agriculture in the Tropics*. Ed. J. Ragland, y R Lal,. Spec. Publ. No. 56. Madison, EE.UU., American Society of Agronomy. Pp: 77-96.

42. Gati, F. 1983. La materia orgánica del suelo, su importancia y formas de mantenerlo. Boletín de Suelos de la FAO No. 51. Roma, Italia pp: 127-154.
43. Girón-Ríos, Y., Oleschko-Lutkova, K., Parrot, Jean-Francois, J.M. Alcantara, E. Camarillo García, E. y Velázquez-García, J.J. 2009. Análisis Fractal de la Reflectancia de los suelos salinos. *Agrociencia* 43(4): 403-416.
44. Gray, S.G. 1968. A review of research on *Leucaena leucocephala*. *Tropical Grassland* 2(1):19-30.
45. Gutiérrez-Castorena, Ma. del C. 1988. Estudio micromorfológico de los cementantes de algunos tepetates del Valle de México y Tlaxcala. Tesis (Maestría en Ciencias), Centro de Edafología Colegio de Postgraduados, Montecillos, México.
46. Haney, R.L., W.H. Brinton and E. Evans, 2008. Estimating Soil Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Mineralization from Short-Term Carbon Dioxide Respiration. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 39: 2706–2720.
47. Haney, R.L. and A.J. Franzluebbers. 2009. Soil CO₂ evolution: Response from arginine additions. *Applied Soil Ecology* 42: 324-327.
48. Hernández C., E. 1996. Caracterización del sistema de roza-tumba y quema en una comunidad chinanteca del trópico húmedo en Usila, Oax. Tesis Profesional. ENEP IZTACALA, UNAM. 89 pp.
49. Hernández-Cruz, E. Palacios-Mayorga, S, J.E. Gama-Castro and V. Cervantes. 2001. Effect of Native Legumes on Soil Restoration under Agroforestry Systems in the South of México In: “International Symposium on Silvopastoral Systems and Second Congress on Agroforestry Systems and Livestock production in Latin America”. Ibrahim, M. (Com) 2001. Pp:63-67. San José Costa Rica.
50. Jackson, M.L., 1965. Soil chemical analysis: Wisconsin, Madison University Press, 498 pp.
51. Jiménez, J.M., R. Solano y E. Viquez. 1994. Evaluación del sistema maíz-maíz (*Zea mays*) en un cultivo con cuatro leguminosas arbóreas. Proyecto AFN. Turrialba (C.R.). CATIE. 15 p.
52. Kass, D. 1997. Perspectivas para el cultivo en callejones en América Latina. *Agroforestería en las Américas* 4 (14): 2-3.
53. Kass, D., J. Jiménez y A. Scholönvoigt. 1997. Como hacer el cultivo en callejones más productivo, sostenible y aceptable a pequeños productores. *Agroforestería en las Américas* 4 (14): 21-23.
54. Kaúrichev, I.S., Panov, N.P., Stratonóvich, M.V. and Grechin, I.P. 1980. Prácticas de Edafología, Ed. Mir, Moscú. pp: 94,95.
55. Kubiena, W.L. 1938. Micropedologia. Ames. Ia. USA.

56. Lara, F.V. and R. Ferrera-Cerrato. 1986. Study of the vesicular arbuscular endomycorrhizal *Leucaena leucocephala* symbiosis. *Leucaena Research Reports* 7:94-95.
57. Le Bissonnais, Y. 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility. *European Journal of Soil Science*. 47(4):495-503.
58. Lupwayi, N.Z. and I. Haque. 1998. Mineralization of N, P, Ca and Mg from Sesbania and Leucaena leaves varying in chemical composition. 1998. *Soil. Biol. Biochem.* 30(3): 337-343.
59. Maier, C.A. and L.W. Kress. 2000. Soil CO₂ evolution and root respiration in 11 year-old loblolly pine (*Pinus taeda*) plantations as affected by moisture and nutrient availability. *Canadian Journal Forestry Research* 30: 347–359.
60. Makinde, E. A. and L. S. Ayeni. 2013. Determination of Mineralization Rate of Organic Materials Using Carbon Dioxide Evolution as an Index. *International Journal of Plant & Soil Science* 2(1): 16-23.
61. Mapa, R.B. and H.P.M. Gunasena. 1995. Effect of alley cropping on soil aggregate stability of tropical. *Agroforestry Systems*. 32:237-245.
62. Martinez-Romero, E. 2001. Poblaciones de Rhizobia nativas de México. *Acta Zool. Mex.(ns) Número Especial, 1*, 29-38.
63. Maydell, H.J. 1991. Agroforestry for tropical rain forest. *Agroforestry Systems*. 13:259-267.
64. McGrath, D.A, M.L. Duryea, W.P. Cropper. 2001. Soil phosphorus availability and fine root proliferation in amazonian agroforest 6 years following forest conversion. *Agriculture, Ecosystem and Environment* 83: 2711-284.
65. Munsell. 1992. *Soil Color Chart, Soil Survey Manual*. Handbook No. 18 Baltimore: U.S. Dep. Agriculture.
66. Nair, P.K.R., Fernandes, E.C.M. and Wambugu, P.N. 1984. Multipurpose leguminous trees and shrubs for agroforestry. *Agroforestry Systems*. 2:145-163.
67. Nair, P.K.R. 1985. Classification of agroforestry system. *Agroforestry Systems*. 3:97-128.
68. N.A.S. (National Academy of Sciences).1975. Under exploited tropical plants with promising economic value. Bostid. Advisory Studies and Special Reports. (16):187 Pp.
69. N.A.S. 1977. *Leucaena*: Promising forage and tree crop for the tropics. Board Science and Technology for International Development. Advisory Studies and Special Reports. (26):118 Pp.
70. N.A.S. 1979 Tropical legumes: Resources for the future. Board Science and Technology for International Development. Advisory Studies and Special Reports. (25):331 Pp.
71. Nherera, F.V., Ndlovu, L.R. and B.H. Dzewela. 1998. Utilisation of *Leucaena diversifolia*, *Leucaena esculenta*, *Leucaena pallida* and *Calliandra calothyrsus* as

- nitrogen supplements for growing goats fed maize stover. *Animal feed Science and Technology*.74: 15-28.
72. Nye and Greenland, D.J. 1960. Changes in the soil after clearing a tropical forest. *Plant and Soil* 21: 101-112.
 73. Oleschko, K. 1989. Evaluación de la eficiencia de la labranza a través de la dinámica de las propiedades físicas del suelo. *Terra* 7(2): 100-108.
 74. Oorts, K., B. Vanlauwe, O. O. Cofie, N. Sanginga, R. Merckx. 2000. Charge characteristics of soil organic matter fractions in a Ferric Lixisol under some multipurpose trees. *Agroforestry Systems* 48 (2):169-188.
 75. Oorts, K., B. Vanlauwe, O., R. Merckx. 2003. Cation exchange capacities of soil organic matter fractions in a Ferric Lixisol with different organic matter inputs. *Agriculture, Ecosystems and Environment* (100) 161-171.
 76. Oyedale, D.J. and P.O., Aina. 1998. A study of soil factors in relation to erosion and yield of maize on a Nigerian soil. *Soil & Tillage Research* 48: 115-125.
 77. Palacios-Mayorga, S. y J.E. Gama-Castro. 1994. Suelos: Génesis, dinámica y degradación. In: Cruz-Reyna S (eds) Ciencias de la Tierra Hoy. México, FCE-UNAM pp. 178-200.
 78. Palm, Ch. A.C.N. Gachengo, R.J. Delve, G. Cadisch and K.E. Giller. 2001. Organic inputs for soil fertility management in tropical agroecosystems: application of an organic resources database. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 83: 27-42.
 79. Paniagua, A., J. Kammerbauer, M. Avedillo and M. Andrews. 1999. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 72: 215-225.
 80. Paul, E.A.; D. Harris, H.P. Collins, U. Schulthess and G.P. Robertson. 1999. Evolution of CO₂ and soil carbon dynamics in biologically managed, row-crop agroecosystems. *Applied Soil Ecology* 11 (1999) 53-65.
 81. Pérez Guerrero, J. 1979. *Leucaena* Leguminosa tropical mexicana. Usos y potencial. Tesis profesional. UACH. México. 80 Págs.
 82. Pramer, D. and E.L. Schmidt. 1974. *Experimental Soil Microbiology*. USA, Burgess Publishing Company, 107 pp.
 83. Rendón, C.H. 1995. Aislamiento y determinación de géneros endomicorrizicos de diez leguminosas silvestres, nativas de la Montaña de Guerrero, México. Tesis profesional, Universidad Autónoma de Guerrero. México.
 84. Ruiz, T.E. y G. Febles (Coord.).1987. *Leucaena (Leucaena leucocephala)*(Lam) de Wit: Una opción para la alimentación bovina en el trópico y subtrópico. Instituto de Ciencia Animal del Ministerio de Educación Superior, La Habana, Cuba. 200 Págs.
 85. SCS-USDA, 1986. *Soil Survey Laboratory Methods and Procedures for Collecting Soils Samples*. Washington D.C., US. Department of Agriculture. Soil Conservation Service, 90p.

86. SCS-USDA, 1998. Soil Survey Manual 18. Washington, D.C., US. Department of Agriculture. Soil Conservation Service. 250 P.
87. Salako, F.K. O. Babalola, S. Hauser and B.T. Kang. 1999. Soil macroaggregate stability under different fallow management systems and cropping intensities in southwestern Nigeria. *Geoderma* 91: 103-123.
88. Sánchez, R.G. y J. Pérez Guerrero. 1977. Potencial y usos de la *Leucaena* en México. Boletín informativo FIRA. 11(103):8-16.
89. Sánchez, A.P. 1991. Suelos del Trópico: Características y manejo. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. Costa Rica.
90. Sánchez, A.P. 1995. Science in Agroforestry. *Agroforestry Systems* (Holanda) 30:125-143.
91. Sanchez, A.P. 1999. Improved fallows come of age in the tropics. *Agroforestry Systems* 47: 3-12.
92. Schroth, G., Lehmann, J. 1995. Contrasting effects of roots and mulch from three agroforestry tree species on yields of alley cropped maize. *Agriculture, Ecosystems and Environment* (54)1-2: 89-101.
93. Siebe, C. 1996. Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo. Sociedad Mexicana de la Ciencia del suelo. 57 págs.
94. Soil Conservation Service. 1996. Procedures for collecting soil samples and methods for analysis for soil survey. Soil Survey Investigations Report No. 8. US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington, D.C.
95. Sorensson, C.T. and J.L. Brewbaker. 1987. Utilization unreduced gametes for production of novel hybrids of *Leucaena* species. *Leucaena Research Reports* 8:75-76.2
96. Sorensson, C.T, and J.L. Brewbaker. 1994. Interpecific compatibility among 15 *Leucaena* species (Leguminosae: Mimosoideae) via artificial hybridizations. *American Journal of Botany*. 81:240-247.
97. Stevenson, F.J. 1994. Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions. John Wiley & Sonns, Inc. 446 pp.
98. Tricart, J. y J. Killiam. 1982. La ecogeografía y la ordenación del medio natural. Anagrama. Madrid, España. 288 Pp.
99. Toledo, I; L. Lloret and E. Martinez-Romero. 2003. *Sinorhizobium americanus* sp. nov., a New *Sinorhizobium* Species Nodulation Native *Acacia* spp. In Mexico. *Systematic and Applied Microbiology*. 26 (1): 54-64.
100. Tornquist C. G., Hons, F.M., Feagley S.E. and J. Hagggar. 1999. Agroforestry system effects on soil characteristics of the Sarapiquí region of Costa Rica. *Agriculture, ecosystems and Environment*. 73: 19-28.

101. Torquebiau, E. 1993. Conceptos de Agroforestería: Una introducción. C. Cano (traduc.). UACH, México.
102. UNESCO-UIBS. 1989. Man and the Biosphere, Programme: University of Exeter, U.K., CAB, International. 65 Pp.
103. USDA, 1993. Manual de levantamiento de suelos 18. Traducido y Modificado para las condiciones de México. CNA - CP. 525 pp.
104. USDA- SSS. 1990. Keys to soil Taxonomy. SMSS Technical Monograph No. 19 Virginia Polytechnic Institute and State University. 422 pp.
105. Vanlauwe, B., N. Sanginga and R. Merckx. 1997. Decomposition of four *Leucaena* and *Senna* prunings in alley cropping systems under sub-humid tropical conditions: the process and its modifiers. *Soil. Biol. Biochem* 29(2): 131-137.
106. Van Zuidam, R.A. 1985. Aerial photointerpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping. Smits Publicares, The Hague. The Netherlands. 575 Pp.
107. Waksman, S.A. and R.L. Starkey, 1924. Microbiological analysis of soil as an index of fertility. *Soil Science* 17: 141.
108. Walkley and Black, 1934, An examination of the Degthareff Method for Determining Soil Organic Matter and a Proposed Modification of the Chromic acid tritration Method: *Soil Science.*, Vol. 3, p 29-38.
109. Watters, R.F. 1971. La agricultura migratoria en América Latina. Cuadernos de fomento forestal No. 17 FAO, Roma, Italia.
110. World Reference Base for Soil Resources (2006). A framework for international classification, correlation and communication. world Soil Resources Reports 103. FAO, 128 Pp.
111. Young, A. 1989. Agroforestry for soil conservation. BPCC Wheatons Ltd. United Kingdome.
112. Zárate P.S. y M. Sousa. 1978. Variación geográfica de *Leucaena* en México. Resúmenes del VII Congreso Mexicano de Botánica. Soc. Bot. Mexico. pp: 12-13.
113. Zárate, P. S. 1994. Revisión del género *Leucaena* en México. *Anales del Instituto de Biología*. UNAM, Serie Botánica 65 (2):83-162.
114. Zárate, P.S. y M. Sousa. 1978. Variación geográfica de *Leucaena* en México. Resúmenes del VII Congreso Mexicano de Botánica. Soc. Bot. de Méx. pp: 12-13.
115. Zhan, Xu-hui, LI Lian-qing, PAN Gen-xing. 2007. Topsoil organic carbon mineralization and CO₂ evolution of three paddy soils from South China and the temperature dependence. *Journal of Environmental Sciences* 19: 319–326.