



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

“EVALUACIÓN DE LOS INDICADORES DE
DEGRADACIÓN DEL SUELO EN EL EJIDO SAN
FERNANDO, VERACRUZ, MÉXICO”.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE :

BIÓLOGO



P R E S E N T A :

RODOLFO CARLO RÍOS MARTÍNEZ SOTO

Tutora: Dra. Silke Cram Heydrich

2006



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

Hoja de Datos del Jurado

| |
|---|
| <p>1. Datos del alumno Ríos Martínez Soto Rodolfo carlo 57 05 31 51 Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ciencias Biología 097156778</p> |
| <p>2. Datos del tutor Dra. Silke Cram Heydrich</p> |
| <p>3. Datos del sinodal 1 Dr. Javier Álvarez Sánchez</p> |
| <p>4. Datos del sinodal 2 M en C Irene Marie Sommer Cervantes</p> |
| <p>5. Datos del sinodal 3 Dr. Arcadio Monroy Ata</p> |
| <p>6. Datos del sinodal 4 M en C Rutilio Ortiz Salinas</p> |
| <p>7. Datos del trabajo escrito Evaluación de los indicadores de degradación del suelo en el Ejido San Fernando, Veracruz, México. 150 p 2006</p> |

AGRADECIMIENTOS

A la Dra. Silke Cram Heydrich, por su paciencia y apoyo brindados para la correcta elaboración del presente trabajo.

A la M. en C. Irene Marie Sommer Cervantes, por sus valiosos consejos y paciencia durante la redacción y estructuración de la tesis.

Al Dr. Javier Álvarez Sánchez, por su tiempo y la crítica hecha a cada uno de los capítulos de esta tesis.

Al Dr. Arcadio Monroy Ata, por el apoyo brindado a la realización de esta tesis.

Al M. en C. Rutilio Ortiz Salinas, por los consejos brindados para la estructuración de esta tesis.

A la M. en C. Estela Carmona, por su apoyo constante en cada uno de los experimentos realizados en este trabajo.

A la M. en C. Pilar Fernández, por su crítica durante la realización de los experimentos enzimáticos y en las cuestiones estadísticas.

A la Q.F.B. Claudia Hernández, por su apoyo durante la realización de los experimentos.

A la Geogr. Celia López Miguel por su valiosa ayuda en la realización de los mapas de los sitios de estudio presentados en este trabajo.

Al P. en Biol. Alberto Mondragón por el apoyo y ayuda recíproca durante la realización de esta tesis.

A todo el personal del LAFQA, Instituto de Geografía, UNAM que aportaron tiempo y apoyo para la realización de la parte experimental de este trabajo.

Al personal del INE de Jalapa, Veracruz por el tiempo y apoyo brindados durante la realización del muestreo.

Este trabajo forma parte de la evaluación de los indicadores de degradación en suelos de la región de Los Tuxtlas, Veracruz, llevándose a cabo en el marco de un proyecto más grande sobre la “conservación y manejo sostenible de la biodiversidad bajo el suelo”. Siendo la agencia implementadora el PNUMA, la ejecutora el Tropical Soil Biology and Fertility (TSBF)-CIAT, y la institución financiadora es el Fondo Mundial para el Medioambiente o GEF (Global Environmental Facility, por sus siglas en inglés).

Establecido en 1991, el GEF brinda ayuda económica a países en desarrollo para la realización de proyectos y programas destinados a proteger el medio ambiente, garantizando el financiamiento de proyectos relacionados con la biodiversidad, cambio climático, aguas internacionales, la capa de ozono, contaminantes orgánicos persistentes y degradación del suelo.

DEDICATORIAS

A mis padres:

Lic. Blanca O. Soto Andrade

Lic. José Guillermo Ríos Martínez

por darle una base a mi existencia.

Para mis amigos:

Arturo Arriaga, por estar en las buenas, en las malas y en las peores ¡¡Gracias Arthur!!

Astrid Morales, por siempre acompañar este canto.

Elizabeth Juárez, por darme el ejemplo de cómo vivir con alegría.

Dahiana Fuentes, por devolverme la alegría y ser la base de la misma, mi querida fan número 1.

Karen Rangel, por siempre estar presente, aun en la lejanía.

Raúl de la Rocha, por sacarme adelante en mis peores momentos.

Abraham Villalobos, por todo lo que hiciste por mí.

Sergio Pérez, eres un buen tipo checo.

Sensei Sixto Laguna, por el apoyo brindado en cada Kata y en cada Kumite.

A Lupe, Nelly, Sergio L., Noemí, Jessica, Elena y a quienes he conocido en el Taishu-kan.

Para todas aquellas personas que a lo largo de este camino le han dado forma a mi aura y han aportado algo al canto de este trovador nocturno:

Gracias por todo, por todo, solo eso les quiero decir...

Si la mente es comprendida, todas las cosas son comprendidas.

Buda

Buscar en la propia naturaleza.

Bodhidharma
(Frase más importante dicha en toda
la historia Zen)

**Somos ángeles caídos con pleno dominio de nuestro destino,
en tu territorio libre y rebelde habita un volcán vivo, entre tu gente.
Callados un águila y un cóndor vigilan a tu pueblo vacío de miedos,
enséñame un arte liberal, enséñame a mi puño siempre levantar...**

Carlo Ríos
Fragmento de
"Un puma camina".

ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| RESUMEN..... | 1 |
| 1 INTRODUCCIÓN..... | 2 |
| 2 MARCO CONCEPTUAL | |
| 2.1 Concepto, importancia y función del suelo..... | 4 |
| 2.2 Calidad del suelo..... | 7 |
| 2.2.1 Funciones de la calidad del suelo..... | 9 |
| 2.3 Degradación del suelo..... | 10 |
| 2.3.1 Tipos de degradación..... | 12 |
| 2.3.2 Procesos de degradación..... | 14 |
| 2.4 Indicadores de degradación del suelo..... | 17 |
| 2.4.1 Selección del método de cuantificación..... | 17 |
| 2.4.2 Tipos de indicadores..... | 19 |
| 2.4.3 Elección de indicadores..... | 22 |
| 2.5 Indicadores biológicos de degradación del suelo..... | 26 |
| 2.5.1 Carbono orgánico..... | 27 |
| 2.5.2 Actividad enzimática..... | 31 |
| 2.5.2.1 Tipos de actividad enzimática..... | 32 |
| 2.5.2.2 β -glucosidasa..... | 34 |
| 2.5.2.3 Deshidrogenasa..... | 40 |
| 2.5.2.4 Problemas durante la cuantificación de la actividad enzimática... | 44 |
| 2.6 Indicadores químicos de degradación del suelo..... | 46 |
| 2.6.1 pH..... | 47 |
| 2.6.2 Conductividad eléctrica..... | 49 |
| 2.7 Indicadores físicos de degradación del suelo..... | 51 |
| 2.7.1 Textura..... | 52 |
| 2.7.2 Densidad del suelo..... | 54 |
| 2.7.3 Porcentaje de porosidad..... | 56 |
| 3 JUSTIFICACIÓN..... | 62 |
| 4 HIPÓTESIS..... | 64 |
| 5 OBJETIVOS | |
| 5.1 Objetivos generales..... | 66 |
| 5.2 Objetivos particulares..... | 66 |
| 6 ZONA DE ESTUDIO | |
| 6.1 Localización..... | 67 |
| 6.2 Edafología..... | 68 |

| | |
|---|------------|
| 6.3 Clima..... | 69 |
| 6.4 Tipos de vegetación | |
| 6.4.1 Selva alta perennifolia..... | 72 |
| 6.4.2 Maizales..... | 74 |
| 6.4.3 Pastizales..... | 75 |
| 6.4.4 Sistemas agroforestales..... | 76 |
| 6.4.4.1 Cafetal..... | 76 |
| 6.4.4.2 Vegetación secundaria (acahual)..... | 77 |
| 7 MÉTODO | |
| 7.1 Muestreo..... | 80 |
| 7.2 Análisis de laboratorio..... | 82 |
| 7.2.1 Análisis biológicos | |
| 7.2.1.1 β -glucosidasa..... | 84 |
| 7.2.1.2 Deshidrogenasa..... | 85 |
| 7.2.1.3 Porcentaje de carbono orgánico..... | 86 |
| 7.2.2 Análisis químicos | |
| 7.2.2.1 pH..... | 88 |
| 7.2.2.2 Conductividad eléctrica..... | 88 |
| 7.2.3 Análisis físicos. | |
| 7.2.3.1 Textura..... | 89 |
| 7.2.3.2 Densidad aparente..... | 90 |
| 7.2.3.3 Densidad real..... | 91 |
| 7.2.3.4 Porcentaje de porosidad..... | 92 |
| 7.3 Análisis estadísticos..... | 92 |
| 8 RESULTADOS..... | 93 |
| 8.1 Indicadores biológicos de degradación. | |
| 8.1.1 β -glucosidasa..... | 96 |
| 8.1.2 Deshidrogenasa..... | 96 |
| 8.1.3 Porcentaje de carbono orgánico..... | 97 |
| 8.2 Indicadores químicos de degradación. | |
| 8.2.1 pH..... | 99 |
| 8.2.2 Conductividad eléctrica..... | 99 |
| 8.3 Propiedades físicas | |
| 8.3.1 Porcentaje de arcillas..... | 101 |
| 8.3.2 Porcentaje de arenas..... | 101 |
| 8.3.3 Porcentaje de limos..... | 102 |
| 8.3.4 Densidad aparente..... | 102 |
| 8.3.5 Densidad real..... | 102 |
| 8.3.6 Porcentaje de porosidad..... | 103 |
| 8.4 Correlaciones..... | 107 |

| | |
|--|------------|
| 9 DISCUSIÓN | |
| 9.1 Indicadores biológicos..... | 108 |
| 9.2 Indicadores químicos..... | 112 |
| 9.3 Indicadores físicos..... | 113 |
| 9.4 Efectos del cambio en el uso de suelo en los indicadores de degradación..... | 116 |
| 10 CONCLUSIONES..... | 119 |
| ANEXO 1 - Características de los sitios de muestreo..... | 121 |
| ANEXO 2 - Resultados de los análisis en los indicadores biológicos por sitio de muestreo..... | 123 |
| ANEXO 3 - Resultados de los análisis en los indicadores físicos por sitio de muestreo..... | 126 |
| ANEXO 4 - Resultados de los análisis en los indicadores químicos por sitio de muestreo..... | 128 |
| ANEXO 5 – Pruebas de Tukey..... | 130 |
| 11 BIBLIOGRAFÍA..... | 132 |

RESUMEN

Se realizó un estudio en el ejido San Fernando perteneciente a la región de Los Tuxtlas, Veracruz para evaluar las respuestas de diferentes indicadores biológicos, químicos y físicos de degradación del suelo bajo diferentes usos antropogénicos del mismo: cultivo de maíz, pastizales y sistemas agroforestales, estos últimos conformados por cafetales y cafetales acahualados o con vegetación secundaria, respecto a la vegetación original conformada por la selva alta perennifolia (Miranda y Hernández-X 1963, en Rzedowski 1978).

Los indicadores de degradación elegidos fueron el porcentaje de carbono orgánico, la actividad de la enzima β -glucosidasa, la actividad de la enzima deshidrogenasa (indicadores biológicos), el pH, la conductividad eléctrica (indicadores químicos), la densidad aparente, la textura del suelo, la densidad real y el porcentaje de porosidad (indicadores físicos).

Los resultados mostraron que tan solo el carbono orgánico, el porcentaje de porosidad, la conductividad eléctrica y la densidad aparente, respondieron como indicadores de degradación al presentar variaciones en sus valores respecto a la vegetación original, siendo más evidente esta disminución en los sitios de maizales. Las actividades de las enzimas β -glucosidasa y deshidrogenasa no mostraron diferencias (aumento o disminución) bajo los diferentes usos antropogénicos del suelo, sin embargo, presentan una menor actividad en suelos bajo cultivo de maíz concluyendo que es la actividad antropogénica que hace disminuir en mayor medida los indicadores de degradación del suelo evaluados.

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo principal del Proyecto GEF es *generar y proporcionar los conocimientos y las técnicas para manejar y conocer la biodiversidad bajo el suelo en países agrícolas tropicales.*

En México, los sitios de estudio fueron elegidos al interior de una vegetación original conformada por selva alta perennifolia en la región de Los Tuxtlas, Veracruz y en la Reserva de la Biosfera de Calakmul, Quintana Roo.

En Veracruz, el proyecto se llevó a cabo en tres diferentes ejidos con diferentes extensiones de vegetación original aun presente y en cuyo territorio se presentan tres diferentes manejos del suelo: cultivo de maíz; pastizales para alimentar a ganado vacuno y sistemas agroforestales bajo cultivo de café, en donde en algunos casos, se ha comenzado a desarrollar vegetación secundaria.

Para alcanzar el objetivo central del proyecto GEF, se realizaron diferentes estudios conjuntos por un equipo multidisciplinario de investigadores los cuales fueron: el conocimiento de la diversidad de la meso y microbiota existente (Ej: diversidad de nemátodos, diversidad de anélidos, diversidad de termitas y hormigas, diversidad de coleópteros), estudios sobre fijación de nitrógeno, estudios sobre hongos fitopatógenos, cantidad y diversidad de micorrizas. Todas las variables cuantificadas y medidas tuvieron como fin indicar el grado de degradación y perturbación del suelo.

Como parte de este trabajo conjunto, se deriva el objetivo del presente estudio: evaluar la variación de diferentes propiedades del suelo usadas como indicadores de degradación, bajo tres diferentes usos del mismo, respecto a la vegetación original existente: la selva alta perennifolia (Miranda y Hernández-X 1963, en Rzedowski 1978).

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Concepto, importancia y función del suelo.

De acuerdo a Buol *et al.* (1978, en Tan 2000) el suelo es considerado un cuerpo natural que cubre parte de la superficie terrestre, brinda soporte al crecimiento de las plantas y sus propiedades (biológicas, físicas y químicas) son afectadas por el clima y los organismos que actúan en él haciendo disponible el material parental, por el relieve y por el tiempo.

Doran *et al.* (1999) opinan que el suelo es un cuerpo dinámico, viviente y natural que es vital para el funcionamiento de los ecosistemas terrestres y representan un balance único entre la materia viva y muerta.

El suelo está constituido de diferentes tamaños de partículas minerales inorgánicas (arena, limos, arcillas); formas reactivas y estables de materia orgánica; organismos vivientes tales como lombrices, insectos, bacterias, hongos, algas, nemátodos, etc.; agua y gases incluyendo O₂, CO₂, N₂, NO₂, y CH₄. Los atributos físicos y químicos del suelo regulan la actividad biológica e intercambios de moléculas/iones entre las fases sólidas, líquidas y gaseosas (Doran *et al.* 1999).

El suelo es un sistema compuesto por tres fases: sólida, líquida y gaseosa. La fase sólida también llamada matriz del suelo, consiste de una mezcla de minerales y material orgánico que brinda el sistema esquelético de un suelo. La fase gaseosa, también llamada aire o atmósfera del suelo, corresponde a una mezcla de gases. La fase líquida, es llamada la solución del suelo, y está compuesta por agua, materiales coloidales y sustancias disueltas (Hillel 1998; Tan 1998).

En un suelo se llevan a cabo partes esenciales de los ciclos del C, N, P y S. La importancia de proteger un suelo determinado, radica en que es un recurso no renovable en el tiempo de vida humano (Jenny 1980, en Doran *et al.* 1999); para que un suelo se regenere a su estructura original se requieren de periodos geológicos (Eswaran 1994). La cantidad de suelo que se forma, algunas veces, sólo es de algunos milímetros por siglo (Barrow 1991) mediante la acción conjunta del clima (cl), los organismos (o), el material parental (p), el relieve (r) en función del tiempo (t) (Jenny 1980, en Doran *et al.* 1999; Tan 2000) (**Fórmula 1**), sin embargo su remoción puede contarse por centímetros cada año (Barrow 1991).

$$S = f(\text{cl}, \text{o}, \text{p}, \text{r}, \text{t}) \quad \text{(Fórmula 1)}$$

Fórmula 1- Relación de los factores que intervienen en la formación del suelo de acuerdo a Jenny (1980, en Doran *et al.* 1999; Tan 2000).

Los factores formadores del suelo pueden presentar diferencias locales, resultando en suelos con características distintas y específicas para cada lugar (Cruz 1992) y de esta forma, realizarán diferentes funciones dentro de los ecosistemas de los que forman parte.

Existen diferentes perspectivas respecto a las funciones que realiza un suelo. En las **Tablas 2.1a y 2.1b** se muestran tanto las funciones globales, así como las funciones locales del suelo.

Tabla 2.1a - Funciones globales del suelo, de acuerdo a Arnold *et al.* (1990) y Szlabocs (1994).

| Funciones globales del suelo. | Características. |
|--|--|
| Función biosférica. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ La pedósfera brinda soporte y regula muchos procesos bióticos. ✓ Acumulación de elementos químicos de origen biológico. |
| Función de interfase e interacción. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ La pedósfera regula y controla muchos procesos bióticos y abióticos, así como los movimientos y flujos de sustancias. |
| Función atmosférica. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Los suelos contribuyen a la química, humedad y balance de calor de la atmósfera. |
| Función hidrosférica. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ La pedósfera redistribuye el flujo del agua en su interior. ✓ Los suelos transforman la precipitación en infiltración. |
| Función litosférica. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ La pedósfera, en su fase sólida, protege la litósfera del impacto destructivo de fuerzas exógenas. |

Tabla 2.1b - Principales funciones locales del suelo.

| Tipo de función. | De acuerdo a Lal (1997). | De acuerdo a Muckel y Mausbach (1996). |
|-----------------------------|---|---|
| Función biológica. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Brindar soporte a la producción de biomasa y a la biodiversidad, incluyendo su preservación e incremento de su pool genético. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Proveer un sitio físico, químico y biológico para los organismos vivos. ✓ Proveer soporte mecánico para los organismos y sus estructuras. ✓ Brindar soporte a la actividad biológica, así como a la diversidad y productividad de plantas y animales. |
| Función atmosférica. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Regular la calidad del aire y del agua mediante mecanismos de filtración, amortiguamiento, detoxificación, así como regular los ciclos geoquímicos. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Regular y repartir el flujo de agua, así como almacenar y reciclar nutrientes y otros elementos. ✓ Filtrar, amortiguar, degradar, immobilizar y detoxificar materiales orgánicos e inorgánicos. |
| Función cultural. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Preservar registros arqueológicos, geológicos y astronómicos. | - |
| Función estética. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Brindar soporte a la estructura socioeconómica, cultural y estética, así como proveer de sostén a la ingeniería. | - |

2.2 Calidad del suelo

La calidad del suelo se refiere a su capacidad para funcionar dentro de los límites ecosistémicos y del uso del suelo, para brindar sostén a la productividad biológica, manteniendo las propiedades ambientales y promoviendo la salud animal y vegetal (Doran y Parkin 1994, en Bandick y Dick 1999; Doran y Parkin 1996).

Karlen *et al.* (1997, en Gil-Sotres *et al.* 2005) opinan que la calidad del suelo es la capacidad de un tipo específico de suelo para funcionar, dentro de los límites naturales o del manejo del ecosistema, para sostener la productividad de las plantas y animales, mantener o incrementar la calidad del aire o del agua, y brindar soporte a la salud y vida humana.

La calidad del suelo es definida por la función del suelo (ver **Tablas 2.1a y 2.1b**) y está determinada por el conjunto sus propiedades físicas, químicas y biológicas interaccionando entre sí (Doran *et al.* 1999); de esta forma se desglosan tres tipos de calidades del suelo: calidad física, calidad química y calidad biológica (Lal 1999) (**Figura 2.2a**), siendo cada una de ellas el resultado del conjunto de sus propiedades individuales (Lal *et al.* 1999) (**Tabla 2.2a**).

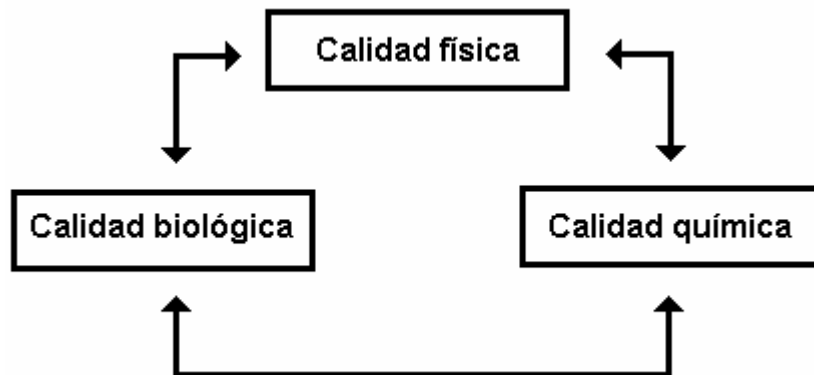


Figura 2.2a - Componentes de la calidad del suelo (a partir de Doran *et al.* 1999).

Tabla 2.2a - Las calidades química, biológica y física son determinadas por un amplio número de propiedades.

| Calidad química. | Referencia. | Calidad biológica. | Referencia. | Calidad física. | Referencia. |
|---|--|---|--|---|---|
| <p>Contenido de sales:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Conductividad eléctrica. ✓ Porcentaje de sodio intercambiable. | NCR (1993); Lal <i>et al.</i> (1999). | <p>Carbono orgánico del suelo:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Cantidad. ✓ Calidad | NCR (1993); Lal <i>et al.</i> (1999). | <p>Estructura del suelo:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Agregación. ✓ Porosidad. ✓ Aireación y tamaño de los poros. | NCR (1993); Papendick (1994); Lal <i>et al.</i> (1999). |
| <p>Reacciones del suelo:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ pH. ✓ Acidez total. ✓ Al³⁺, Mn⁺³. | NCR (1993); Lal <i>et al.</i> (1999). | <p>Fauna del suelo (micro, meso y macrofauna):</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Lombrices. ✓ Termitas. ✓ Atrópodos. ✓ Hongos. ✓ Bacterias. ✓ Nematodos. ✓ Otros. | Pankhurst (1994); Lal <i>et al.</i> (1999). | <p>Medio de crecimiento:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Profundidad de raíces. ✓ Capa restrictiva de raíces. | NCR (1993); Lal <i>et al.</i> (1999). |
| <p>Reservas de nutrimentos:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Disponibilidad de nutrimentos para las plantas (N, P, K). ✓ Suficiencia. ✓ Toxicidad. | Norton <i>et al.</i> (1994); Lal <i>et al.</i> (1999). | <p>Complejos organo-minerales:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ [(C-P-OH)_x]_y | Lal <i>et al.</i> (1999). | <p>Dureza del suelo:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Compactación. ✓ Encostramiento. | Lal <i>et al.</i> (1999). |
| <p>Propiedades de carga:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Capacidad de intercambio catiónico. ✓ Capacidad de intercambio del aluminio. | Lal <i>et al.</i> (1999). | <p>Flora del suelo:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Algas. ✓ Protozoarios. | Pankhurst (1994); Lal <i>et al.</i> (1999). | <p>Agua:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Capacidad de disponibilidad de agua. ✓ Rango mínimo limitante de agua. | NCR (1993); Lal <i>et al.</i> (1999). |
| | | <p>Microbiota del suelo.</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Biomasa microbial. ✓ Conteo microbial. ✓ Potencial de mineralización del C y N. ✓ Nitrificación y denitrificación. ✓ Análisis de ADN. ✓ Actividad enzimática. | Doran <i>et al.</i> (1994); Lal (1994, 1997, 1997a, 1999); Lal <i>et al.</i> (1999); Pankhurst (1994); Gil-Sotres <i>et al.</i> (2005); Trasar-Cepeda <i>et al.</i> (2000, 2000a). | <p>Densidad del suelo:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Densidad aparente. ✓ Densidad real o densidad de las partículas. | Papendick (1994). |
| | | | | <p>Textura del suelo:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Porcentaje de arcilla. ✓ Porcentaje de limo. ✓ Porcentaje de arena. | Papendick (1994). |

2.2.1 Funciones de la calidad del suelo.

De acuerdo a Lal (1997, 1997a, 1999) las dos funciones generales de la calidad del suelo son: su capacidad de regulación ambiental y el mantenimiento de su productividad.

Como ejemplos de estas dos funciones generales, se incluyen la habilidad de (1) aceptar, tomar, liberar nutrimentos y otros constituyentes químicos, (2) aceptar, tomar y liberar agua a las plantas, a la superficie y recargar los mantos acuíferos, (3) promover y mantener el crecimiento de las raíces, (4) mantener la sustentabilidad del hábitat biótico del suelo y (5) responder al manejo y resistir a la degradación (Larson y Pierce 1991, en Brejda *et al.* 2000).

La máxima calidad de un suelo, esto es, cuando existe un equilibrio dinámico de todos sus componentes en el ambiente, es alcanzada cuando el suelo es capaz de mantener una alta productividad y de causar la mínima distorsión ambiental, alcanzando la vegetación su estado clímax, llamándosele de esta forma: *suelo clímax* (Gil-Sotres *et al.* 2005).

Las dificultades en la evaluación de la calidad del suelo y la identificación de propiedades clave que sirvan como indicadores de la función del suelo ha sido un gran problema debido a la multiplicidad de factores biológicos, bioquímicos, físicos y químicos que controlan los procesos biogeoquímicos, a su variación a lo largo del tiempo y del espacio (Aon *et al.* 2001), y a la influencia de la precipitación y la temperatura en la actividad biológica que contribuyen a marcadas fluctuaciones estacionales (NCR 1993; Bandick y Dick 1999). Sin embargo, existen diferentes maneras de evaluar los cambios en la calidad del suelo producto de la degradación, los cuales se verán a continuación.

2.3 Degradación del suelo

Una reducción en la calidad de un suelo resulta en su degradación (NCR 1993). La degradación del suelo se refiere a la pérdida de su productividad y utilidad actual o potencial. Ello implica una disminución en la capacidad inherente de un suelo para producir bienes o servicios y llevar a cabo funciones de regulación ambiental. La degradación del suelo ocurre cuando los suelos no pueden llevar a cabo una o algunas de sus funciones (Ver **Tablas 2.1a** y **2.1b**); sin embargo, es complicado que ocurran todas las funciones al mismo tiempo debido a que algunas se excluyen mutuamente. La severidad e impacto de la degradación del suelo es determinada por la calidad del suelo, su resiliencia, el clima y el estado del tiempo, factores ambientales y el tipo de manejo (Lal 1997) (**Figura 2.3a**).

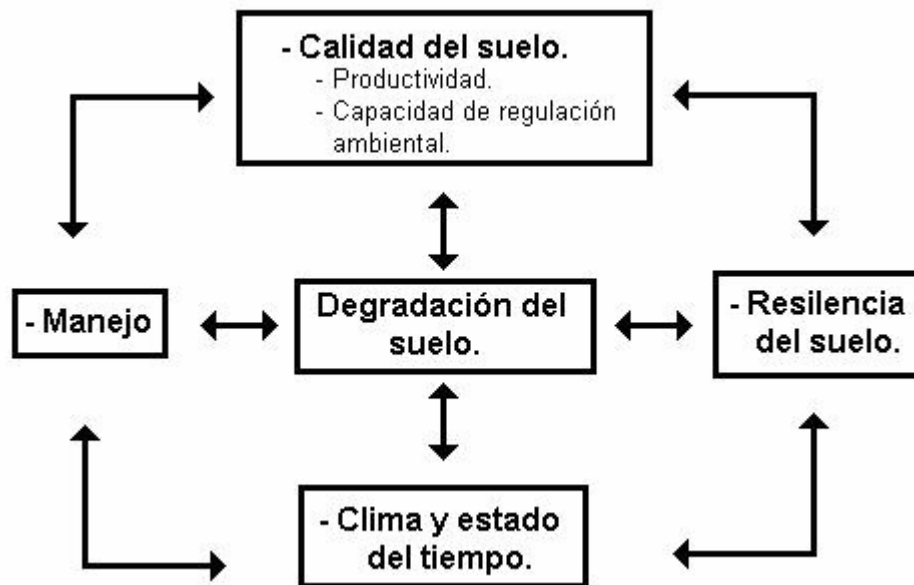


Figura 2.3a - La degradación del suelo: su severidad e impacto es afectada por la resiliencia del suelo, la calidad del suelo, el clima y estado del tiempo, y por el tipo de manejo (modificado de Lal 1997).

Existen una gran variedad de definiciones de degradación del suelo. Una definición precisa de la degradación del suelo es imposible, dados los muchos factores responsables que intervienen en ella (Barrow 1991). Lal (1994) opina que el término ha llegado a ser vago, y su estimación y alcance podrían llegar a ser altamente subjetivos, por esta razón se muestran otras definiciones de la degradación del suelo en la **Tabla 2.3a**.

Es importante señalar que la degradación del suelo no es lo mismo que *degradación de la tierra*, la cual implica la degradación de la capacidad total de la tierra para producir bienes económicos y llevar a cabo sus funciones de regulación ambiental a una gran escala y no a una escala local (Hartemink 2003).

Tabla 2.3a – Definiciones de degradación de suelo y los autores que las proponen.

| Degradación del suelo. | Referencia |
|--|--|
| Es la pérdida de la utilidad actual o utilidad potencial del suelo mediante la reducción, pérdida o cambio en sus propiedades. | Barrow (1991). |
| Es una reducción de la actual o futura capacidad de un suelo para producir, en términos de cantidad y calidad, bienes o servicios. | Dregne (1987) y Higgins (1988) (en Barrow 1991); Lal (1994). |
| Es un proceso el cual reduce la actual y/o futura capacidad de los suelos para producir bienes o servicios. | Oldeman (1994). |
| Es el resultado de algunos factores o de su combinación, los cuales reducen el estatus físico, químico y biológico del suelo, pudiendo limitar su capacidad productiva. | Chisholm y Dumsday (1987, en Barrow 1991). |
| Es la pérdida de la calidad intrínseca del suelo o la disminución de sus capacidades; no se trata del resultado de una vía, sino del resultado de fuerzas humanas y naturales concentradas en un sitio. | Blaikie y Brookfield (1987, en Barrow 1991). |
| Es la disminución, mediante la pérdida o reducción de la energía del suelo, de la capacidad productiva o calidad del suelo; dado que todas sus funciones están basadas en la energía, la degradación del suelo es igual a la pérdida o reducción de las funciones de un suelo o de los usos del mismo, esto significa que la degradación del suelo puede ser definida con base en formas de energía específicas del suelo, funciones del suelo y usos del mismo. | Blum (1997). |

2.3.1 Tipos de degradación.

Existen dos tipos principales de degradación del suelo que son establecidos por su origen (Barrow 1991; Blum 1997; Lal 1997; Doran *et al.* 1999) (**Figura 2.3b**):

- a) **Natural**: generada por la acción de los factores formadores del suelo.
- b) **Antropogénica**: generada por las actividades humanas.

La degradación antropogénica es potencialmente reversible, o mínimo, puede ser detenida. La degradación natural es prevenible sólo con un alto costo, ya que generalmente es determinada por los procesos naturales (Dregne 1997). Los procesos de degradación natural son lentos y no son evidentes, sin embargo, son acelerados cuando los procesos de degradación antropogénicos actúan en el suelo (Lal 1999).

En el año de 1991, Oldeman *et al.* (en Hartemink 2003) elaboraron un mapa para cuantificar el grado global de degradación del suelo (GLASOD, por sus siglas en inglés). En ese estudio reconocieron cinco principales tipos de intervención humana que generaba degradación del suelo (1) deforestación, (2) sobrepastoreo, (3) prácticas agrícolas, (4) sobreexplotación de la cobertura vegetal y (5) diferentes actividades industriales y bioindustriales.

De los dos grandes tipos de degradación, natural y antropogénica, se originan tres diferentes categorías de degradación de acuerdo a las propiedades que afectan: degradación física, química y biológica (**Figura 2.3b**) (Lal 1997, 1999), produciendo como consecuencia cambios adversos en la calidad del suelo (**Figura 2.3c**) (Lal 1999).

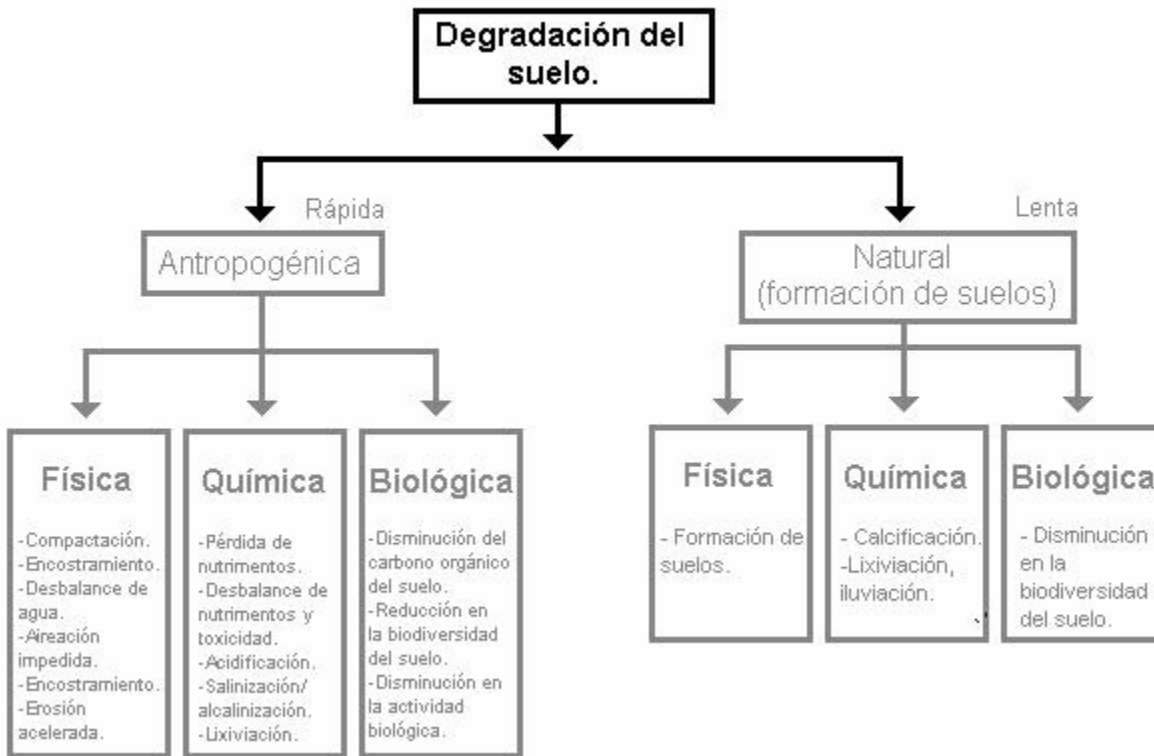


Figura 2.3b- Tipos principales de degradación de suelos de acuerdo a su origen y algunos de los procesos de degradación que generan (modificado de Lal 1997, 1999).

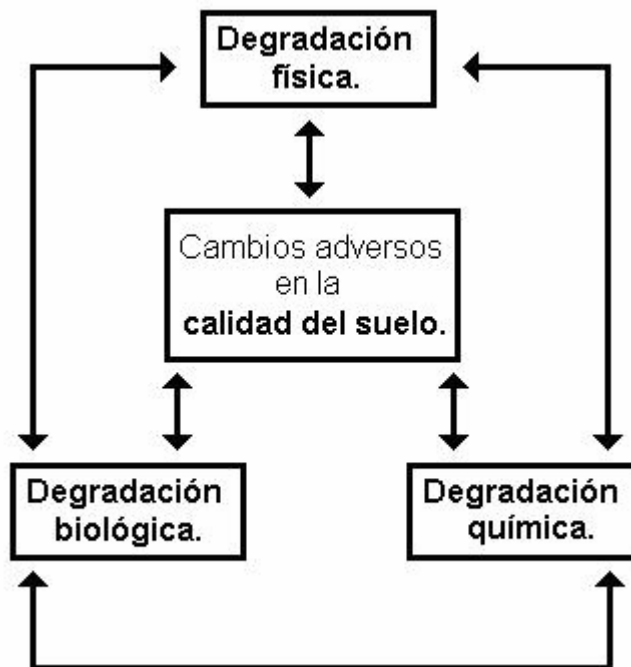


Figura 2.3c- Cambios adversos en la calidad del suelo son generados por procesos de degradación física, química y biológica (modificado de Lal 1999).

2.3.2 Procesos de degradación.

Los procesos de degradación son puestos en movimiento por el deterioro de la estructura y rompimiento de los ciclos del carbono, la reducción de reservas de nutrimentos en el suelo y el debilitamiento en los mecanismos de reciclaje de tales nutrimentos (Lal 1994). Estos procesos pueden variar a lo largo del tiempo (Barrow 1991). Dos categorías de los procesos de degradación del suelo son reconocidas (Barrow 1991; Lal 1994; Oldeman 1994):

- a) La primer categoría es llamada *degradación cuantitativa* o *degradación erosiva*, y se refiere a los procesos de degradación que generan un desplazamiento del material del suelo, es decir, la pérdida de la cantidad del suelo; los dos mayores tipos de degradación en esta categoría son las fuerzas erosivas por viento y agua (**Tabla 2.3b**).

- b) La segunda categoría es llamada *degradación cualitativa* o *degradación no erosiva*, y se refiere a los procesos de degradación que generan un deterioro *in situ*, en donde pueden ocurrir procesos de degradación químicos, físicos y/o biológicos cuyos resultados son la pérdida de la calidad del suelo, es decir, una pérdida en su capacidad funcional. En términos de la función del suelo como productor de biomasa, se refiere a una reducción de su fertilidad (**Tabla 2.3b**).

Algunos de los procesos de degradación son explicados en la **Tabla 2.3c** donde se abordan sus orígenes y efectos en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo y cómo podría llegarse a afectar su calidad.

Tabla 2.3b – Categorías de degradación del suelo, cuantitativa (erosiva) y cualitativa (no erosiva) y ejemplos de procesos de degradación. (1) Los procesos de degradación más importantes, de acuerdo a Lal (1994, 1997) (Barrow 1991; Lal 1994, 1997; Oldeman 1994; Stott *et al.* 1999).

| Degradación cuantitativa del suelo (Degradación erosiva) | Degradación cualitativa del suelo (Degradación no erosiva) |
|--|--|
| Pérdida del suelo por: <ul style="list-style-type: none"> ✓ Erosión (viento y agua)¹ ✓ Movimientos en masa del suelo. ✓ Pérdidas por solubilidad | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Disminución en la fertilidad.¹ ✓ Reducción y/o pérdida de nutrientes.¹ ✓ Cambios estructurales; debilitamiento estructural.¹ ✓ Compactación. ✓ Acidificación.¹ ✓ Pérdida de materia orgánica. ✓ Salinización. ✓ Encostramiento. ✓ Cambios en la aireación y contenido de humedad. ✓ Cambios en la concentración de elementos traza, sales, compuestos alcalinos. ✓ Contaminación por elementos químicos, ✓ Cambios en la flora y fauna. |

Tabla 2.3c – Procesos de degradación, su origen y efectos en el suelo.

| Proceso de degradación. | | Referencias. |
|-------------------------------|--|--|
| Erosión. | Originado a partir de fuerzas eólicas o hídricas, el más común de sus efectos es la pérdida del mantillo, generando un subsuelo menos productivo, lo que reduce la capacidad para tomar y reciclar nutrientes, absorber, retener y reciclar libremente el agua y el aire. | Papendick (1994). |
| Encostramiento | Se origina en suelos con una baja estabilidad estructural por medio de la dispersión y el rompimiento de los agregados del suelo. Se impide la correcta permeabilidad del suelo, la germinación de plántulas y el mantenimiento de la microbiota del suelo. | NCR (1993); USDA (1993); Hillel (1998). |
| Compactación. | La compactación es originada, principalmente por el equipo agrícola o por el pastoreo del ganado. Estas actividades originan incremento en la densidad aparente, reducción del espacio poroso reduciendo o impidiendo la aireación, infiltración, el crecimiento de las raíces y la actividad de la meso y microbiota en el suelo. | Papendick (1994); Håkansson y Voorhees (1997). |
| Baja permeabilidad | La permeabilidad se refiere a la facilidad con la que se conduce el agua en el suelo, es determinada por el espacio poroso. Una baja permeabilidad es originada por un mal drenaje, pérdida en la estructura y compactación del suelo. | USDA (1993); Hillel (1998). |
| Salinización. | Tiene diferentes orígenes (1) cambios físicos estructurales originan aumento en la evapotranspiración del suelo incrementando los iones en solución y la salinidad; (2) es originada también por el encostramiento del suelo, una mala permeabilidad, un mal drenaje y un aumento en la intemperización química. | NCR (1993). |
| Alcalización. | Es un proceso por el cual el sodio (Na^+) llega a ser el catión dominante en la solución del suelo debido a la precipitación de compuestos de calcio y magnesio. Sus efectos son perceptibles en regiones áridas donde el pH llega a valores de entre 8.5-10, dispersando la materia orgánica y las partículas de arcilla, perdiendo así su estructura. | Papendick (1994). |
| Acidificación. | Tiene su origen de forma natural a lo largo del tiempo en regiones húmedas, aunque es también causada por la aplicación excesiva de fertilizantes de nitrógeno. Los suelos llegan a ser ácidos cuando las bases (Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+ , Na^+) son lixiviadas y reemplazadas por el ion H^+ resultando en suelos con pH menores a 7. Los suelos altamente ácidos pueden limitar el crecimiento de las plantas debido a la insuficiencia de calcio y magnesio, al incremento a niveles tóxicos del aluminio intercambiable, a la reducción en la disponibilidad de nutrientes y a cambios en las tasas de descomposición de la materia orgánica del suelo. | NCR (1993). |
| Pérdida de nutrientes. | La pérdida de nutrientes genera una reducción en la fertilidad del suelo; los procesos implicados son la lixiviación, la desnitrificación, así como la volatilización y fijación biológica del nitrógeno. Estos procesos son afectados por el manejo del suelo y por factores agroecológicos. | Hartemink (2003). |

2.4 Indicadores de degradación del suelo.

La degradación del suelo, y los cambios en su calidad no pueden medirse directamente, pero pueden cuantificarse mediante el uso de indicadores (Brejda *et al.* 2000). Un indicador es una propiedad (física, química o biológica), un proceso o una característica que puede ser medida y que es monitora de los cambios en el suelo (Muckel y Mausbach 1996; Taylor *et al.* 2002). De esta forma, la medición o cuantificación de la degradación del suelo se realizará estimando los efectos de los procesos de degradación en algunas de las propiedades edáficas (Dregne 1997).

Sin embargo, para definir cuantitativamente la degradación del suelo de acuerdo a sus diferentes procesos, es necesario delinear los valores umbrales o los límites críticos de las propiedades del suelo, más allá de los cuales, los procesos que brindan soporte a la vida del suelo son puestos en peligro. Estos límites variarán para diferentes tipos de suelos, condiciones climáticas, sistemas agrícolas, usos de la tierra, y formas de manejo (Lal 1994).

2.4.1 Selección del método de cuantificación.

De acuerdo a Hartemink (2003), existen dos maneras de cuantificar los cambios en la degradación del suelo. Estas formas de cuantificar los cambios en sus propiedades son llamadas del Tipo I y II.

- a) La cuantificación del tipo I implica el seguimiento de los cambios de un conjunto de propiedades en un tipo de suelo sujeto a un uso determinado a lo largo del tiempo.

- b) La cuantificación del tipo II implica la comparación de un conjunto de propiedades del suelo bajo diferentes usos del mismo en un momento determinado. Se asume durante la cuantificación del tipo II que los usos del suelo deben ser bajo manejo y sin manejo, teniendo ambos tipos de suelo un origen común o al menos que sean del mismo tipo. Se asume, también, que los cambios son atribuidos al manejo del suelo, aun cuando muchas veces las propiedades de un suelo no cultivado tienen valores mayores a las de un suelo cultivado.

El problema comienza cuando queremos definir un suelo no degradado. Partiendo de la cuantificación del tipo I entendemos que los parámetros del suelo a comparar corresponden a su condición inicial. Para la cuantificación del tipo II los parámetros a comparar son determinados por un suelo que no ha sido perturbado.

Para definir qué entendemos por suelo no perturbado podemos partir de la definición de calidad del suelo (Gil-Sotres *et al.* 2005):

- a) La calidad máxima de un suelo es alcanzada cuando el suelo es capaz de mantener una alta productividad y causar la mínima distorsión ambiental.
- b) La calidad máxima de un suelo es alcanzada cuando el suelo está en total equilibrio con todos los componentes ambientales; el suelo entonces, es llamado suelo *clímax*, desarrollado bajo una vegetación *clímax* condicionada por el conjunto de los factores ecológicos y no perturbada por el hombre (Duchaufour 1977) (Ver sección **2.2.1**).

De esta forma, el tipo de cuantificación del tipo II deja abierta la posibilidad de que el suelo no perturbado, o sin manejo, sea un suelo climax.

Doran *et al.* (1999) opinan que la calidad del suelo, así como sus cambios, deben ser determinados justamente en referencia a suelos nativos no degradados, entendiéndose que ocurrirá una degradación del suelo cuando éste tenga una menor calidad que un suelo nativo (Norton *et al.* 1999); es decir, sabremos que existe degradación de un suelo determinado si durante la evaluación de sus propiedades (físicas, químicas y biológicas) obtenemos variaciones en función de un suelo nativo o suelo climax, producto de la actividad antropogénica o de factores ambientales.

Cuantificar la degradación del suelo de manera comparativa con relación a un suelo nativo no degradado (Doran *et al.* 1999; Norton *et al.* 1999) o a un suelo climax (Gil-Sotres *et al.* 2005) es complicado, dado que en muchas ocasiones este suelo ha prácticamente desaparecido (Gil-Sotres *et al.* 2005). Sin embargo, cuando este suelo existe, se convierte en una forma directa de determinar y evaluar las variaciones de su calidad.

2.4.2 Tipos de indicadores.

Larsen y Pierce (1991, en Papendick 1994) proponen que la calidad del suelo y su degradación pueden ser medidas mediante la selección de indicadores o propiedades clave que brinden un mínimo conjunto de datos, que permitan obtener otras propiedades del suelo mediante la relación de funciones que son llamadas “funciones de pedotransferencia”. Estas funciones se obtienen relacionando diferentes características y propiedades para ser usadas

en la evaluación de los cambios en la calidad del suelo durante el uso de la tierra o las prácticas de manejo (NCR 1993) (**Tabla 2.4a**).

Gil-Sotres *et al.* (2005) proponen una clasificación de las propiedades bioquímicas, que puede ser usada tanto para las propiedades físicas, químicas y biológicas; para de diferentes maneras, usar estas propiedades individuales para generar propiedades complejas que puedan indicar la calidad del suelo y su degradación.

- a) El uso de propiedades individuales: una forma común de estimar la variación de la calidad del suelo.
- b) El uso de índices sencillos: es la relación entre dos parámetros medidos. (Filip 2002, en Gil-Sotres *et al.* 2005).
- c) El uso de índices complejos: son derivados de la combinación de diferentes propiedades o de su deducción con base en procedimientos estadísticos.

En la **Tabla 2.4a** se muestran las propiedades del suelo con el número de propiedades implicadas para generarlas; los índices sencillos son aquellos que utilizan dos propiedades; los índices complejos son aquellos en donde se utilizan tres o más propiedades para generarlas.

Tabla 2.4a – Propiedades o atributos del suelo que pueden ser estimados a partir de propiedades básicas, usando funciones de pedotransferencia o modelos simples (Modificada de Doran *et al.* 1999). CIC (capacidad de intercambio catiónico); EPOA (espacio poroso ocupado por el agua); DA (Densidad aparente).

| Número de variables implicadas | Variables sencillas o básicas necesarias | Propiedad o atributo del suelo. | Referencias (en Doran, <i>et al.</i> 1999, excepto *) |
|--------------------------------|--|---|--|
| 1 | Textura del suelo | Conductividad hidráulica. | Larson y Pierce (1991, 1994). |
| 1 | Actividad de la deshidrogenasa. | Actividad metabólica de la microbiota. | Nannipieri <i>et al.</i> (1990).* |
| 1 | Actividad de la β -glucosidasa. | Degradación de la materia orgánica. | Bandick y Dick (1999).* |
| 2 | pH del suelo + CE | Actividad microbiota/planta o potencial de contaminación. | Smith y Doran (1996).* |
| 2 | C orgánico + clase de textura del suelo. | Densidad aparente suelo. | Rawls (1983). |
| 2 | C orgánico + tipo y contenido de arcilla. | CIC ^b | Larson y Pierce (1991, 1994). |
| 2 | EPOA calculado de DA y el contenido de agua. | Actividad aeróbica y anaeróbica por parte de la microbiota. | Linn y Doran (1984); Doran <i>et al.</i> (1990). |
| 2 | Respiración del suelo (temperatura del suelo + EPOA) | Ciclos de C y N. | Parkin <i>et al.</i> (1996). |
| 3 | % arena, limo y arcilla, + C orgánico + DA | Capacidad de retención de agua. | Gapta y Larson (1979). |
| 3 | C orgánico, % de arena, CE | Pérdida de nitratos vía denitrificación/humedad de los suelos. | Aulakh y Singh (1996). |
| 3 | DA, EPOA, pH. | Profundidad de raíces. | Larson y Pierce (1991, 1994). |
| 3 | Número de células, volumen, densidad. | Biomasa | Stevenson (1991, en Aon <i>et al.</i> 2001)*. |
| 4 | DA, EPOA, pH, CE y aireación. | Productividad del suelo. | Larson y Pierce (1991, 1994). |
| 4 | Textura del suelo, pH, C orgánico (conductividad hidráulica, CIC, profundidad) | Potencial de lixiviado. | Shea <i>et al.</i> (1992). |
| 4 | C orgánico, % arcilla, DA, y contenido de agua. | Estructura / resistencia del suelo. | da Silva y Kay (1997). |
| 4 | C orgánico, textura del suelo, estructura y permeabilidad. | Factor de erosionabilidad del suelo. | Jones, A.J., <i>comunicación personal con Doran et al.</i> (1999), Junio, 1996 |
| 5 | N total. | Biomasa microbial C, capacidad de mineralización del N, actividad de la fosfomonoesterasa, β -glucosidasa y ureasa. | Trasar-Cepeda <i>et al.</i> (1998, en Trasar-Cepeda <i>et al.</i> 2000).* |

2.4.3 Elección de indicadores.

En el correcto funcionamiento de un suelo está envuelto un inmenso número de propiedades físicas, químicas y biológicas (Gil-Sotres *et al.* 2005); estas propiedades contribuyen a formar la calidad del suelo, sin embargo se encuentran ampliamente interrelacionadas y son afectadas entre sí (NCR 1993); de esta forma, definir el valor específico de cada una de las propiedades del suelo como indicadores de degradación, se vuelve una tarea complicada (Stott *et al.* 1999).

Los criterios para la elección de indicadores de degradación del suelo radican en su utilidad para definir procesos ecosistémicos e integrar otras propiedades físicas, químicas y biológicas que puedan reflejar su condición actual y/o futura, por ejemplo, al reemplazar la vegetación original por un sistema de manejo (Doran *et al.* 1999).

Las propiedades del suelo muestran variaciones temporales y estacionales (NCR 1993; Bandick y Dick 1999), por esta razón, no es apropiado elegir indicadores que cambien en algunas semanas o meses debido a cambios estacionales, a cambios debidos a la humedad o al ciclo de crecimiento de las plantas; así mismo, las propiedades que muestren cambios después de 5 años o más tampoco son buenos indicadores. Los mejores indicadores de la calidad del suelo son aquellas propiedades que muestren cambios significativos entre 1 y 3 años (Stott *et al.* 1999).

Dada la imposibilidad de seleccionar y cuantificar todas las propiedades del suelo, la selección de los indicadores debe satisfacer una serie de requisitos (**Tabla 2.4b**).

Tabla 2.4b - Requisitos que deben cubrir los indicadores de cambios en la calidad del suelo o indicadores de degradación, de acuerdo a Elliot (1994) y Dalal (1998).

| Elliot (1994, en Gil-Sotres <i>et al.</i> 2005). | Dalal (1998, en Gil-Sotres <i>et al.</i> 2005). |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ✓ Sensibilidad a la presencia del mayor número posible de agentes o procesos de degradación. ✓ Consistencia en la dirección del cambio sufrido en respuesta a un contaminante dado. ✓ Habilidad para reflejar los diferentes niveles de degradación. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Medir una o más funciones del suelo. ✓ Ser suficientemente sensible para reflejar cambios durante un disturbio, restauración o manejo. ✓ Proveer de valores de referencia, críticos o umbrales. ✓ Ser fácilmente interpretables. ✓ Ser de fácil y no costosa obtención |

Doran y Parkin (1996) consideran un mínimo conjunto de indicadores para evaluar la calidad del suelo, los cuales son sensibles a cambios en el manejo del suelo y a su degradación, estos incluyen propiedades físicas (textura, densidad aparente y real, capacidad de retención de agua), químicas (pH, conductividad eléctrica, nivel de nutrimentos) y biológicas (C y N presente en la biomasa microbial, N potencialmente mineralizable y respiración del suelo). Karlen *et al.* (1997, en Debosz *et al.* 1999) y Parkinson (1992, en NRC 1993) incluyen en este conjunto mínimo de indicadores la actividad enzimática como parte de los indicadores biológicos.

En este estudio se hizo uso de propiedades individuales así como el uso de índices sencillos como indicadores de la degradación del suelo. Los indicadores físicos, químicos, biológicos elegidos de acuerdo a Doran y Parkin (1996), Karlen *et al.* (1997, en Debosz *et al.* 1999) y Parkinson (1992, en NRC 1993) para evaluar la degradación del suelo en tres sitios se enumeran en la **Tabla 2.4c**, donde también se ofrece una detallada información acerca de sus relaciones con la función del suelo, tiempo en el cual sufren variaciones, su sensibilidad a las prácticas en el manejo así como su relación a otras propiedades del suelo.

Tabla 2.4c – Propiedades del suelo usadas como indicadores de degradación, su sensibilidad al manejo del suelo y el tiempo de respuesta al manejo. Arnold *et al.* (1990)¹; Doran y Parkin (1996)²; (Muckel y Mausbach 1996)³; (*) correlación no definida.

| Propiedades del suelo usadas como indicadores de degradación. | Su relación a la condición y función del suelo. ² | Importancia del tipo de indicador. ³ | Tiempo de respuesta al manejo. ¹ | Sensibilidad al manejo del suelo. | Propiedades correlacionadas (usadas en este estudio). | Autor. |
|--|--|--|---|-----------------------------------|---|--|
| <p>✓ Porcentaje de carbono orgánico.</p> <p>✓ Actividad enzimática (Deshidrogenasa).</p> | <p>Propiedades biológicas. Define la fertilidad del suelo, su estabilidad y su propensión a la erosión; Se utiliza para modelar procesos del suelo y la normalización de un sitio.</p> <p>Define la actividad de la microbiota.</p> | <p>Indicadores biológicos. Indican tanto el contenido, calidad y descomposición de la materia orgánica en el suelo, teniendo relación con la formación y estabilidad de agregados, siendo afectados por otros indicadores físicos y químicos del suelo.</p> | <p>10⁰ – 10² años.</p> | <p>Si</p> | <p>β - glucosidas. Deshidrogenasa. pH. Conductividad eléctrica. Densidad aparente. Porcentaje de porosidad.</p> | <p>NCR (1993); De la Paz <i>et al.</i> (2002); Sicardi, <i>et al.</i> (2004); García y Hernández (1997).</p> |
| <p>✓ Actividad enzimática (β-glucosidas).</p> | <p>Forma parte importante en el ciclo del C.</p> | | <p>10⁻¹ – 10⁰ años.</p> | <p>Si</p> | <p>Porcentaje de carbono orgánico. pH* Conductividad eléctrica.</p> | <p>Sicardi <i>et al.</i> (2004); Camiña <i>et al.</i> (1998); Aon y Colaneri (2001)*; García y Hernández (1997).</p> |
| <p>✓ pH.</p> | <p>Propiedades químicas. Define el umbral de la actividad biológica y química; esencial para hacer modelos de diferentes procesos en el suelo.</p> | <p>Indicadores químicos. Determinan y afectan las relaciones planta-suelo, calidad del agua, capacidad de amortiguamiento, disponibilidad de nutrientes y agua para las plantas y otros organismos, movilidad de contaminantes y algunas condiciones</p> | <p>10⁻¹ – 10¹ años.</p> | <p>No</p> | <p>Porcentaje de carbono orgánico. Deshidrogenasa* β - glucosidas* pH* Porcentaje de limos, arenas y arcillas.</p> | <p>Bredja <i>et al.</i> (2000); De la Paz (2002); Aon y Colaneri (2001)*; García y Hernández (1997)*.</p> |

Tabla 2.4c – Propiedades del suelo usadas como indicadores de degradación... (continuación).

| Propiedades del suelo usadas como indicadores de degradación. | Su relación a la condición y función del suelo. ² | Importancia del tipo de indicador. ³ | Tiempo de respuesta al manejo. ¹ | Sensibilidad al manejo del suelo. | Propiedades correlacionadas (usadas en este estudio). | Autor. |
|---|--|---|---|-----------------------------------|---|--|
| <p>✓ Conductividad eléctrica.</p> | Define el umbral de la actividad de la microbiota y de las plantas. | físicas como la tendencia a formar encostramiento. | < 10 ⁻¹ – 10 ⁰ años. | Si | Deshidrogenasa. Carbono orgánico. pH* | Smith y Doran (1996); García y Hernández (1997); Aon y Colaneri (2001)*. |
| Propiedades físicas. | | | | | | |
| <p>✓ Porcentaje de porosidad.</p> | Definen el flujo, retención y transporte de las fases líquidas y gaseosas del suelo. Propiedades usadas para estimar compactación, baja permeabilidad y erosión del suelo. | Están relacionados al arreglo de las partículas sólidas y a los poros. Indican las limitaciones al crecimiento de raíces, germinación, infiltración o movimientos de agua entre los perfiles del suelo. | < 10 ⁻¹ años. | Si | Densidad aparente. Densidad real. Porcentaje de carbono orgánico. | Brady (1974); Tan (1996). |
| <p>✓ Textura.</p> | | | > 10 ³ años. | No | pH | Brady (1974); Bredja et al. (2000). |
| <p>✓ Densidad aparente.</p> | | | < 10 ⁻¹ años. | Si | Porcentaje de carbono orgánico. Densidad real. Porcentaje de porosidad. | Brady (1974); Doran y Parkin (1996). |
| <p>✓ Densidad real.</p> | | | > 10 ³ años. | No | Porcentaje de porosidad. Densidad aparente. | Brady (1974); Tan (1996). |

2.5 Indicadores biológicos de degradación del suelo.

Algunos autores han optado por nombrar a las propiedades relacionadas con la cantidad, actividad, efectos de la microbiota y la vegetación de un sitio como biológicas (Doran 1994; Lal 1994, 1997, 1999; Pankhurst 1994). Otros las nombran como propiedades bioquímicas generales y específicas (Trasar-Cepeda *et al.* 2000, 2000a; Gil-Sotres *et al.* 2005), y otros las nombran de las dos formas (García y Hernández 1997). Para fines prácticos, aquí se nombran como indicadores biológicos. Los indicadores biológicos brindan un medio eficaz de cuantificación del grado de degradación del suelo (García y Hernández 1997; Gil-Sotres *et al.* 2005) debido a su alta sensibilidad y son considerados los más apropiados para responder al estrés ambiental (Pankhurst *et al.* 1995, en Trasar-Cepeda *et al.* 2000) (**Tabla 2.5a**)

Visser y Parkinson (1992, en Trasar-Cepeda *et al.* 2000) sugieren que las propiedades biológicas y bioquímicas que son más usadas para detectar el deterioro de la calidad del suelo son aquellas que están más estrechamente relacionadas a los ciclos de nutrientes, respiración del suelo, biomasa microbial, capacidad de mineralización del nitrógeno y a la actividad de las enzimas del suelo.

Los indicadores biológicos pueden ser divididos en tres grandes categorías: (1) indicadores de la productividad del suelo, (2) indicadores de la estabilidad y sustentabilidad, (3) indicadores de la contaminación del suelo. Los indicadores para las dos primeras categorías tienen una relación estrecha; entre ellas se encuentran la materia orgánica y a la actividad enzimática (Pankhurst 1994).

Tabla 2.5a - Propiedades biológicas y bioquímicas del suelo usadas para determinar el grado de degradación del suelo.

| Propiedades biológicas (Doran 1994; Lal 1994, 1997, 1997a, 1999; Pankhurst 1994) o bioquímicas generales (Gil-Sotres <i>et al.</i> 2005; Trasar-Cepeda <i>et al.</i> 2000, 2000a) | Propiedades biológicas (Doran 1994; Lal, 1994, 1997, 1997a, 1999; Pankhurst 1994) o bioquímicas específicas (Gil-Sotres <i>et al.</i> 2005; Trasar-Cepeda <i>et al.</i> 2000, 2000 ^a) |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ✓ Materia orgánica. ✓ Biomasa microbial. ✓ Actividad de la deshidrogenasa. ✓ Conteo microbial. ✓ Potencial de mineralización del N. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Actividad de la β-glucosidasa. ✓ Análisis de ADN para cuantificar especies particulares. |

2.5.1 Carbono orgánico.

El carbono orgánico del suelo es definido como la cantidad total de carbono contenido en la materia orgánica del suelo y es quizás el indicador de calidad y/o degradación, que de manera individual, es el más importante en la determinación de la calidad del suelo y de su productividad (NCR 1993) debido a que es el único indicador que tiene un efecto en un mayor número de propiedades físicas, químicas y biológicas (Pankhurst 1994). Brock (1999) y Schnitzer (1991) en Stott *et al.* (1999) enumeran un gran número de efectos que tiene la materia orgánica en la calidad del suelo en la **Tabla 2.5b**.

El carbono encontrado en el suelo es dividido en carbono orgánico e inorgánico. El análisis del contenido de carbono orgánico del suelo está en relación directa con el contenido de materia orgánica (Tan 1996).

La materia orgánica del suelo consiste de tres componentes originales: (1) organismos vivos, (2) residuos de plantas y animales parcialmente descompuestos, (2) residuos de plantas y animales descompuestos.

Cuando se lleva a cabo la descomposición de la materia orgánica se forma el *humus*, el cual corresponde a la fracción de los residuos vegetales que ha sido descompuesta por la acción de un proceso de digestión enzimática por parte de la microbiota, originando un material oscuro, amorfo y coloidal, con una capacidad de tomar agua y nutrientes superior a las arcillas (Brady 1974).

El *humus* está compuesto de (1) sustancias no húmicas y (2) sustancias húmicas. Las sustancias no húmicas corresponden a carbohidratos, lignina, proteínas y lípidos. Las sustancias húmicas corresponden del 50 % al 85 % de la materia orgánica. Alrededor del 65 % al 75 % de este humus es compuesto por la materia húmica y tan solo del 35 % al 25 % corresponden a la fracción no húmica (Ver **Figura 2.5a**) (Tan 1996).

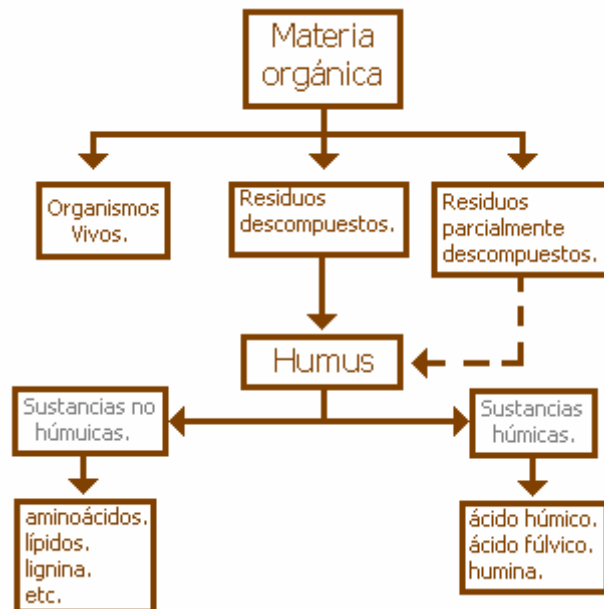


Figura 2.5a – Componentes de la materia orgánica en el suelo (a partir de Tan 1996)

La cantidad de materia orgánica en el suelo depende de un complejo conjunto de interacciones de procesos físicos, químicos y biológicos (Fenton *et al.* 1999); a su vez, algunas de las propiedades del suelo son una función del contenido de materia orgánica (Rovira 1993, en Doran *et al.* 1999) (Ver **Tabla 2.5b**).

Tradicionalmente la materia orgánica del suelo se ha considerado un importante indicador de la calidad del suelo, de su degradación y de los procesos metabólicos que en él ocurren por parte de la microbiota (Saviozzi *et al.* 2001; De la Paz *et al.* 2002). García y Hernández (1997) opinan que la materia orgánica cambia muy lentamente a lo largo del tiempo y puede requerirse de varios años (Ver **Tabla 2.4c**) para que sea evidente su papel como indicador de degradación.

La importancia de la cuantificación del carbono orgánico como indicador de degradación, radica en que algunas de las prácticas de manejo comunes, son llevadas a cabo durante un largo periodo de tiempo, en el cual se puede conducir a una gradual degradación que afecte tanto la cantidad, como la calidad de la materia orgánica (García *et al.* 2002) (**Tabla 2.5c**) así como el porcentaje de carbono orgánico, resultando en cambios en la actividad biológica, reducción en los nutrimentos de las plantas, en la estabilidad y la estructura del suelo (Fye 1987, en NCR 1993; Rahimi *et al.* 2000).

El intervalo de valores reportados en trabajos anteriores para el contenido de carbono orgánico son mostrados en conjunto con los valores de pH, conductividad eléctrica, densidad aparente, densidad real, porcentaje de porosidad y tipo de textura en la **Tabla 2.7f**.

Los sitios bajo un uso actual de cafetales o maizales que anteriormente tuvieron una cobertura vegetal de selva, han demostrado tener un alto contenido de carbono orgánico. Aguilera (1989) reporta valores para cafetales de Veracruz que van del 8.70 %, a 3.12 % y 3.48 % para suelos bajo cultivos de maíz (**Tabla 2.7f**)

Tabla 2.5b– Efectos físicos, químicos y biológicos de la materia orgánica en la calidad del suelo (Schnitzer 1991, en Stott *et al.* 1999; USDA 1996).

| Efectos físicos. | Efectos químicos. | Efectos biológicos. |
|--|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ✓ Favorece la agregación del suelo. ✓ Estabiliza y une las partículas del suelo, reduciendo la erosión. ✓ Favorece un buen drenaje y aireación del suelo. ✓ Aumenta la capacidad para tomar agua. ✓ Mantiene al suelo en una condición de baja densidad aparente. ✓ Controla la evaporación. ✓ Aumenta la permeabilidad. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Retiene nutrientes al promover la capacidad de intercambio catiónico y aniónico. ✓ Favorece la formación de complejos de metales. ✓ Aumenta la capacidad de amortiguamiento. ✓ Provee y hace disponible el N, P, y S y micronutrientes. ✓ Aumenta la adsorción de pesticidas y otros químicos de origen antropogénico. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Favorece las actividades de bacterias, hongos, actinomicetos, lombrices, raíces y otros microorganismos. ✓ Provee de carbono y energía a los microorganismos del suelo. ✓ Retiene el carbono atmosférico. |

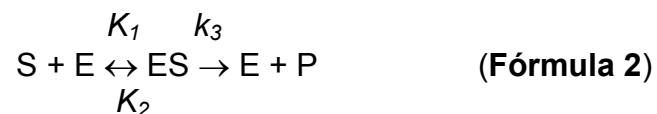
Tabla 2.5c- Tabla comparativa de prácticas que reducen o incrementan la materia orgánica en el suelo (USDA 1996).

| Prácticas que decrecen la materia orgánica (USDA 1996) | Prácticas que incrementan la materia orgánica en el suelo (USDA 1996) |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ✓ Reemplazo de la vegetación perenne por vegetación estacional. ✓ Introducción de especies más agresivas y menos productivas. ✓ Remoción de los productos de las plantas. ✓ Incineración de los residuos vegetales después de la cosecha. ✓ Incendios forestales ✓ Agricultura, labranza ✓ Drenaje de los suelos ✓ Pastoreo intensivo | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Aplicación de abonos orgánicos. ✓ Fertilización e irrigación para incrementar la producción de la biomasa. ✓ Producción de plantas que produzcan gran cantidad de biomasa ✓ Prácticas de restauración ecológica (Ej. reforestación. Rotación de cultivos.) ✓ Protección del fuego ✓ Control de plagas. |

2.5.2 Actividad Enzimática.

La degradación de las propiedades de los suelos ha orillado a buscar indicadores que de manera rápida y sencilla reflejen dicha degradación (Dick 1994, en Aon y Colaneri 2001). La actividad enzimática es un indicador que provee información integral del estado de la microbiota del suelo, y es dependiente de sus condiciones físicas y químicas (Aon y Colaneri 2001); la principal ventaja que brindan las enzimas del suelo como indicadores de degradación es su rápida respuesta a cambios en el manejo del suelo en comparación con otras propiedades biológicas y de esta forma, pueden ser usadas como indicadores tempranos de cambios biológicos (Bandick y Dick 1999) (Ver **Tabla 2.4c**).

Una enzima es una proteína que cataliza de manera específica una reacción química sin sufrir alteraciones estructurales (Skujins 1978, en Dick y Tabatabai 1993). Una enzima (E) en presencia de un sustrato (S) actúa formando un complejo o compuesto con dicho sustrato (ES) transformándolo y sintetizando un producto (P) y liberando la enzima (E) (Tabatabai 1994); de esta forma, la capacidad catalítica de una enzima es cuantificada por la tasa de síntesis del producto de una reacción química específica (Tabatabai 1994).



Donde K_1 , K_2 y K_3 , son las respectivas constantes de velocidades de reacción de los tres procesos (Tabatabai 1994).

Todas las transformaciones bioquímicas en los suelos son dependientes de, o relacionadas a la presencia de enzimas (Gianfreda y Bollag 1996). Cada tipo de suelo tiene determinados niveles de actividad enzimática, dependiendo de su origen, cantidad de materia orgánica, la diversidad y actividad de los organismos viviendo en él, y consecuentemente en la actividad de los procesos biológicos (Kuprevich y Shcherbakova 1971. en Gianfreda y Bollag 1996).

2.5.2.1 Tipos de actividad enzimática.

Las diferentes enzimas que existen en el suelo son producidas en su mayoría por la microbiota y las raíces de las plantas (Dick y Tabatabai 1993). Pueden ser clasificadas como *intracelulares* y *extracelulares* (Nannipieri y Gianfreda 1998). La primer categoría corresponde a las enzimas asociadas a células vivas, mientras que las segundas están más relacionadas a la actividad extracelular ambiental presentes en solución del suelo por secreción o lisis, a enzimas activas asociadas con células muertas y a fracciones inorgánicas como arcillas o a coloides húmicos, siendo inmovilizadas en una red tridimensional de macromoléculas o matriz del suelo (Skujins 1978, en Dick y Tabatabai 1993; Nannipieri y Gianfreda 1998).

De acuerdo a Gianfreda y Bollag (1996), las enzimas extracelulares en el suelo pueden encontrarse en tres diferentes lugares: (1) operando a distancia de la célula de origen, (2) en la solución del suelo y (3) asociadas a la pared celular de las raíces o de los microorganismos que las produjeron.

De acuerdo a su función, las enzimas del suelo se dividen en 4 clases (Dick y Tabatabai 1993), y cada una de ellas está involucrada en un ciclo biogeoquímico (Gianfreda y Bollag

1996) (Ver **Tabla 2.5d**). De los cuatro tipos de enzimas encontrados en el suelo, las enzimas más importantes y las más estudiadas, por número y función son las hidrolasas y oxidoreductasas (Gianfreda y Bollag 1996; Nannipieri y Gianfreda 1998).

Tabla 2.5d – Las cuatro clases de enzimas, ciclos biogeoquímicos y número aproximado de enzimas encontradas en el suelo (Gianfreda y Bollag 1996).

| Clases de enzimas | Ciclo o ciclos biogeoquímicos. | Número de enzimas encontradas en el suelo. |
|--------------------|--|--|
| a) Oxidoreductasas | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Carbono ✓ Oxígeno ✓ Nitrógeno. | 11 |
| b) Transferasas | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Carbono ✓ Nitrógeno ✓ Azufre. | 3 |
| c) Hidrolasas | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Carbono ✓ Nitrógeno ✓ Fósforo ✓ Azufre. | 20 |
| d) Liasas. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Nitrógeno. | 1 |

2.5.2.2 β -glucosidasa

La β -glucosidasa es una enzima del tipo hidrolasa (Moorhead y Sinsabaug 2000), anteriormente conocida como gentiobiasa o celobiasa (Turner *et al.* 2002), que lleva a cabo su actividad catalítica tanto dentro, como fuera de los microorganismos que la sintetizan (Gianfreda y Bollag 1996). Se encuentra en plantas, animales y microorganismos (Eivazi y Tabatabai 1990). A escala edáfica son producidas en su mayoría, por bacterias y hongos celulolíticos (Aon *et al.* 2001) y su actividad corresponde en mayor medida a una enzima extracelular.

En conjunto con las demás enzimas extracelulares, la β -glucosidasa puede formar parte de la matriz del suelo (fracción arcillosa) al ser inmovilizada mediante uniones iónicas en la superficie de las partículas arcillosas (Hayano y Katami 1977), llamándosele así a esta fracción del suelo: *fracción abiótica* (Aon y Colaneri 2001).

La β -glucosidasa tiene la actividad de una enzima limitada por su sustrato (Alef y Nannipieri 1995) convirtiendo la celobiosa a glucosa, azúcar de bajo peso molecular; jugando así un rol crítico y crucial en el ciclo del carbono del suelo y en la obtención de fuentes de energía para los microorganismos (Bandick y Dick 1999; Moorhead y Sinsabaugh 2000; Pérez de Mora *et al.* 2005).

La β -glucosidasa es una de las tres o más enzimas involucradas en la escarificación o descomposición de la celulosa, el mayor componente de los polisacáridos de las plantas (Tabatabai 1994; Turner *et al.* 2002). La celulosa consiste de cadenas de polímeros de β -1,4, glucosa, su degradación se inicia por la endo- β -1,4-glucanasa, la cual rompe las cadenas de

celulosa en pequeñas unidades; la celubiohidrolasa parte las unidades resultantes en dímeros de celobiosa (dos moléculas unidas de β -1,4 glucosa). La β -glucosidasa completa el proceso de hidrólisis, catalizando la división de la celobiosa para liberar dos moléculas de glucosa por mol de celobiosa, regulando la provisión de un indispensable recurso de energía para la microbiota (Tabatabai 1994; Turner *et al.* 2002).

Una ecuación general de una reacción de hidrólisis actuando sobre compuestos glicosil (diferentes tipos de glucósidos) es como sigue (Tabatabai 1994):



Donde un glucósido es definido como aquella sustancia que durante una hidrólisis ácida libera uno o algunos monosacáridos y un aglicón.

Su síntesis es afectada por todos los factores que afectan a los microorganismos del suelo, como lo es la humedad, temperatura y disponibilidad de nutrimentos (Dick y Tabatabai 1993; Kourtev *et al.* 2002), por el acceso que tengan a los sustratos orgánicos, es decir qué tan cerca se encuentren (Giallard *et al.* 1999; Moorhead y Sinsabaugh 2000) así como la calidad del material orgánico originado a partir de la vegetación (Álvarez y Guerrero 2000; Moorhead y Sinsabaugh 2000; Waldrop *et al.* 2000; Trasar-Cepeda *et al.* 2000a; Kourtev *et al.* 2002).

Diferentes métodos han sido usados para cuantificar su actividad en el suelo. La mayoría de ellos utilizan un tipo de sustrato llamado *p*-nitrofenil glucopiranoside, el cual es hidrolizado liberando como producto *p*-nitrofenil (Alef y Nannipieri 1995).

La reacción general de la β -glucosidasa se muestra en la **Fórmula 4** (Eivazi y Tabatabai 1990):



Donde ROH = compuesto hidroxilado, R = grupo alkyl, aryl o glucosil

Diferentes resultados se han presentado utilizando el método descrito por Tabatabai (1982) y Eivazi y Tabatabai (1988, en Alef y Nannipieri 1995). Algunos de ellos han añadido pequeñas modificaciones al método, lo cual ha limitado la comparación entre resultados. Los valores reportados para la enzima son mencionados en la **Tabla 2.5e**.

Tabla 2.5e - Diferentes valores reportados para la actividad de la β -glucosidasa, propiedades del suelo relacionadas con la enzima, y métodos utilizados durante los diferentes estudios.

| Características del estudio (época del año, uso del suelo, etc.). | Intervalo de valores para la enzima β -glucosidasa. | Propiedades del suelo relacionadas con la enzima β -glucosidasa. | Autor. | Método utilizado. | Tipos de suelo y/o de textura. | Tipo de estudio y localización. |
|---|---|--|---------------------------------|--|---|---|
| TO= | 169 ± 15 g PNP $m^{-3} h^{-1}$ | ✓ Porcentaje de carbono orgánico. | Aon y Colaneri (2001). | Modificado de Dick <i>et al.</i> (1996). | Aquic Arguidoll. | Cambio de uso de suelo antes, durante y después de un cultivo. Buenos Aires, Argentina. |
| TI= | 282 ± 9.7 g PNP $m^{-3} h^{-1}$ | ✓ Conductividad eléctrica. | | | | |
| T2= | 262 ± 8 g PNP $m^{-3} h^{-1}$ | | | | | |
| Suelo nativo= | 105 ± 20 μ mol PNP $g^{-1} h^{-1}$ | ✓ Materia orgánica. | García y Hernández (1997). | Masciandaro <i>et al.</i> (1994). | Franco arcillosos. Arcillosos. Limoso arcillosos. | Cambio de uso de suelo. |
| Suelo reforestado= | 405 ± 90 μ mol PNP $g^{-1} h^{-1}$ | ✓ Biomasa microbial. ✓ Respiración basal. | | | | |
| Bosque nativo. | | | | | | |
| Invierno = | 286 ± 12 mg PNP $kg^{-1} ha^{-1}$ | ✓ Carbono orgánico. | De la Paz <i>et al.</i> (2002). | Eivazi y Tabatabai (1988). | Vertic Arguidoll. | Cambio de uso de suelo. |
| Verano = | 242 ± 30 mg PNP $kg^{-1} ha^{-1}$ | ✓ Actividad de la deshidrogenasa. | | | | |
| Conversión a pastizal. | | | | | | |
| Invierno = | 308 ± 43 mg PNP $kg^{-1} ha^{-1}$ | ✓ Ureasa | | | | |
| Verano = | 259 ± 27 mg PNP $kg^{-1} ha^{-1}$ | ✓ Fosfomonoesterasa ácida. | | | | |
| Suelo bajo cultivo sin labranza (6 años). | | ✓ Arilsulfatasa. | | | | |
| Invierno = | 195 ± 17 mg PNP $kg^{-1} ha^{-1}$ | ✓ Proteasa | | | | |
| Verano = | 200 ± 12 mg PNP $kg^{-1} ha^{-1}$ | ✓ pH | | | | |
| Suelo bajo cultivo continuo. | | ✓ Respiración basal. | | | | |
| Invierno = | 144 ± 16 mg PNP $kg^{-1} ha^{-1}$ | | | | | |
| Verano = | 168 ± 17 mg PNP $kg^{-1} ha^{-1}$ | | | | | |

Tabla 2.5e - Diferentes valores reportados para la actividad de la β -glucosidasa... (continuación).

| Características del estudio (época del año, uso del suelo, etc.). | Intervalo de valores para la enzima β -glucosidasa. | Propiedades del suelo relacionadas con la enzima β -glucosidasa. | Autor. | Método utilizado. | Tipos de suelo y/o de textura. | Tipo de estudio y localización. |
|---|---|---|-------------------------------------|-------------------|------------------------------------|--|
| Suelo control. | | | Pérez de Mora <i>et al.</i> (2005). | Tabatabai (1982). | Franco arcillosos. | Bioremediación de suelos. |
| 1er mes = | ≈ 100 mg PNP $\text{kg}^{-1} \text{h}^{-1}$ | 1er mes: ✓ Arilsulfatasa. | | | | |
| 6to mes = | ≈ 200 mg PNP $\text{kg}^{-1} \text{h}^{-1}$ | | | | | |
| Suelo con composta (residuos municipales). | | 6to mes: ✓ Biomasa microbial. ✓ Carbono hidrosoluble. ✓ Arilsulfatasa. | | | | |
| 1er mes = | ≈ 1000 mg PNP $\text{kg}^{-1} \text{h}^{-1}$ | | | | | |
| 6to mes = | ≈ 900 mg PNP $\text{kg}^{-1} \text{h}^{-1}$ | | | | | |
| Suelo con composta (residuos vegetales) | | | | | | |
| 1er mes = | ≈ 100 mg PNP $\text{kg}^{-1} \text{h}^{-1}$ | | | | | |
| 6to mes = | ≈ 400 mg PNP $\text{kg}^{-1} \text{h}^{-1}$ | | | | | |
| Suelo mejorado a base de leonardita. | | | | | | |
| 1er mes = | ≈ 200 mg PNP $\text{kg}^{-1} \text{h}^{-1}$ | | | | | |
| 6to mes = | ≈ 400 mg PNP $\text{kg}^{-1} \text{h}^{-1}$ | | | | | |
| Suelo mejorado a base de hojarasca. | | | | | | |
| 1er mes = | ≈ 1000 mg PNP $\text{kg}^{-1} \text{h}^{-1}$ | | | | | |
| 6to mes = | ≈ 1200 mg PNP $\text{kg}^{-1} \text{h}^{-1}$ | | | | | |
| Suelo mejorado a base de residuos de remolacha. | | | | | | |
| 1er mes = | ≈ 200 mg PNP $\text{kg}^{-1} \text{h}^{-1}$ | | | | | |
| 6to mes = | ≈ 400 mg PNP $\text{kg}^{-1} \text{h}^{-1}$ | | | | | |
| Suelos de maizal: | | - | Renella <i>et al.</i> (2004). | Tabatabai (1982). | Arcillo arenosos, arenic udifluent | Respuesta del suelo a un metal pesado. |
| Sitio control = | ≈ 1500 mg PNP $\text{kg}^{-1} \text{h}^{-1}$ | | | | | |
| Sitio 1 = | ≈ 2000 mg PNP $\text{kg}^{-1} \text{h}^{-1}$ | | | | | |
| Sitio 2 = | ≈ 1000 mg PNP $\text{kg}^{-1} \text{h}^{-1}$ | | | | | |
| Sitio 3 = | ≈ 1500 mg PNP $\text{kg}^{-1} \text{h}^{-1}$ | | | | | |
| Conjunto de suelos bajo otros usos: | | | | | | |
| Sitio control = | ≈ 500 mg PNP $\text{kg}^{-1} \text{h}^{-1}$ | | | | | |
| Sitio 4 = | ≈ 1000 mg PNP $\text{kg}^{-1} \text{h}^{-1}$ | | | | | |
| Sitio 5 = | ≈ 500 mg PNP $\text{kg}^{-1} \text{h}^{-1}$ | | | | | |
| Sitio 6 = | ≈ 500 mg PNP $\text{kg}^{-1} \text{h}^{-1}$ | | | | | |

Tabla 2.5e - Diferentes valores reportados para la actividad de la β -glucosidasa... (continuación).

| Características del estudio (época del año, uso del suelo, etc.). | Intervalo de valores para la enzima β -glucosidasa. | Propiedades del suelo relacionadas con la enzima β -glucosidasa. | Autor. | Método utilizado. | Tipos de suelo y/o de textura. | Tipo de estudio y localización. |
|---|---|--|-----------------------|-------------------|--------------------------------|--|
| Superficial(0.0-0.03m): Con buffer= | $\approx 30 \mu\text{g PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ | Suelos arcillosos con y sin solución buffer: | Taylor et al. (2002). | Tabatabai (1982). | Franco limoso. | Comparación de la actividad microbial a diferentes profundidades y con diferentes soluciones buffer durante su análisis. |
| Sin buffer= | $\approx 25 \mu\text{g PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ | <ul style="list-style-type: none"> / Materia orgánica. / Biomasa microbial. / UFC / pH / Arilsulfatasa. / Deshidrogenasa. / Fosfatasa ácida. / Fosfatasa alcalina. | | | | |
| Medio (1.0-1.3m): Con buffer= | $\approx 5 \mu\text{g PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ | | | | Arcillo limosa. | |
| Sin buffer= | $< 2.5 \mu\text{g PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ | | | | | |
| Profundo (2.7-3.0m): Con buffer= | $< 2.5 \mu\text{g PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ | | | | Franco limosa. | |
| Sin buffer= | $< 2.5 \mu\text{g PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ | | | | Franco arenosos. | |
| Superficial(0.0-0.03m): Con buffer= | $\approx 20 \mu\text{g PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ | Suelos arenosos con y sin solución buffer: | | | | |
| Sin buffer= | $\approx 15 \mu\text{g PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ | <ul style="list-style-type: none"> / Materia orgánica. / Biomasa microbial. / UFC / Arilsulfatasa. / Deshidrogenasa. / Fosfatasa ácida. / Fosfatasa alcalina. | | | Arenoso | |
| Medio (1.0-1.3m): Con buffer= | $\approx 5 \mu\text{g PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ | | | | | |
| Sin buffer= | $\approx 5 \mu\text{g PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ | | | | | |
| Profundo (2.7-3.0m): Con buffer= | $< 5 \mu\text{g PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ | | | | Arenoso. | |
| Sin buffer= | $< 5 \mu\text{g PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ | | | | | |

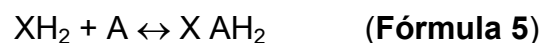
2.5.2.3 Deshidrogenasa.

La deshidrogenasa es una enzima oxidoreductasa intracelular (Aon y Colianeri 2001) presente en todos los microorganismos y su análisis en el suelo tiene relación directa con el total de los organismos vivos (Taylor *et al.* 2002). La cuantificación de esta enzima es un método común para estimar el potencial de la actividad de la microbiota en el suelo debido a que se le considera como una medida exacta de la capacidad oxidativa o catabólica de la microbiota (Nannipieri *et al.* 1990; Friedel *et al.* 1994; García *et al.* 2002; De la Paz *et al.* 2002). En el suelo suele encontrarse en la membrana plasmática de las bacterias heterotróficas, así como en las membranas mitocondriales de los hongos (Aon y Colianeri 2001; Aon *et al.* 2001).

La actividad de la deshidrogenasa funciona de la siguiente forma: en presencia de cofactores activos cataliza la oxidación de un gran número de compuestos orgánicos mediante la remoción de electrones o hidrógenos de sustratos a aceptores durante la degradación de la materia orgánica (Nannipieri *et al.* 1990).

La oxidación microbiana de las sustancias orgánicas bajo condiciones aerobias está ligada a cambios de transporte de los electrones en las uniones de las membranas microbiales, donde el O₂ es el aceptor final de los electrones y es acoplado a la síntesis de ATP en la llamada fosforilación oxidativa (Lehninger 1978 y Alef 1995, en Camiña *et al.* 1997).

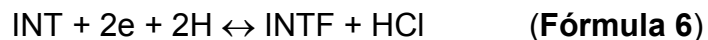
La totalidad de los procesos durante la deshidrogenización se presentan en la **Fórmula 5**.



Donde XH₂ = Es un compuesto orgánico donador de hidrógenos, A = es un aceptor de hidrógenos.

Para cuantificar la actividad de la deshidrogenasa se utiliza un aceptor de electrones artificial llamado INT, cloruro de 2-(*p*-iodofenil)-3-(*p*-nitrofenil)-5-feniltetrazolio, el cual es reducido a *p*-iodonitrotetrazolium formazán violeta debido a su alta afinidad de electrones (Von Mersi y Schinner 1991, en Camiña *et al.* 1997). Los microorganismos presentes en el suelo reducen el INT derivando en INT-formazán el cual es extraído por THF (tetrahidrofurano) (Friedel *et al.* 1994).

La reducción del INT es representada en la siguiente reacción (Packard 1971, en Nannipieri *et al.* 1990):



Diferentes tipos de deshidrogenasas están envueltas en la actividad total de la deshidrogenasa en los suelos, y estos sistemas enzimáticos juegan un papel importante en las etapas iniciales de oxidación o descomposición de la materia orgánica (Ross 1971, en Camiña *et al.* 1997; Bolton *et al.* 1985, en García y Hernández 1997; Gianfreda y Bollag 1996). Sin embargo la determinación de su actividad puede llevar una incertidumbre, debido a que el INT es un aceptor de electrones con una menor afinidad que el O₂ (Gianfreda y Bollag 1996).

Al igual que la enzima β-glucosidasa, la cuantificación de la actividad de la deshidrogenasa se ha llevado a cabo por diferentes métodos. Los métodos más utilizados cuantifican la catálisis del TTC (cloruro de trifeniltetrazolio) y del INT (cloruro de iodonitrotetrazolio). En este trabajo se cuantificó la reducción del INT por su mayor eficiencia que el TTC. Algunos valores son mostrados en la **Tabla 2.5f** en donde diferencias en el tiempo de incubación, concentración del sustrato o temperatura hacen difícil la comparación de resultados.

Tabla 2.5f – Diferentes valores reportados para la actividad de la deshidrogenasa, propiedades del suelo relacionadas con la enzima, y métodos utilizados durante los diferentes estudios.

| Características del estudio (época del año, uso del suelo, etc.) | Intervalo de valores para la enzima deshidrogenasa. | Propiedades del suelo relacionadas con la enzima deshidrogenasa. | Autor. | Método utilizado. | Tipos de suelo o de textura. | Tipo de estudio y localización. |
|--|---|--|-------------------------------------|--|------------------------------|---------------------------------|
| Suelo control. | | 1er mes: | Pérez de Mora <i>et al.</i> (2005). | Trevors (1984, modificado por García <i>et al.</i> 1993). | Franco Arcilloso. | Bioremediación de suelos. |
| 1er mes = | | ✓ pH | | | | |
| 6to mes = | < 10 mg INTF Kg ⁻¹ 20 h ⁻¹ | ✓ Carbono hidrosoluble. | | | | |
| Suelo con composta (residuos municipales). | | ✓ Cd | | | | |
| 1er mes = | < 10 mg INTF Kg ⁻¹ 20 h ⁻¹ | ✓ Zn | | | | |
| 6to mes = | ≈ 50 mg INTF Kg ⁻¹ 20 h ⁻¹ | ✓ Biomasa microbial. | | | | |
| Suelo con composta (residuos vegetales) | | ✓ Arilsulfatasa. | | | | |
| 1er mes = | < 5 mg INTF Kg ⁻¹ 20 h ⁻¹ | 6to mes: | | | | |
| 6to mes = | ≈ 50 mg INTF Kg ⁻¹ 20 h ⁻¹ | ✓ pH | | | | |
| Suelo mejorado a base de leonardita. | | ✓ Cd | | | | |
| 1er mes = | < 5 mg INTF Kg ⁻¹ 20 h ⁻¹ | ✓ Zn | | | | |
| 6to mes = | | ✓ Biomasa microbial. | | | | |
| Suelo mejorado a base de hojarasca. | | ✓ Arilsulfatasa. | | | | |
| 1er mes = | < 5 mg INTF Kg ⁻¹ 20 h ⁻¹ | | | | | |
| 6to mes = | < 5 mg INTF Kg ⁻¹ 20 h ⁻¹ | | | | | |
| Suelo mejorado a base de residuos de remolacha. | | | | | | |
| 1er mes = | < 5 mg INTF Kg ⁻¹ 20 h ⁻¹ | | | | | |
| 6to mes = | ≈ 100 mg INTF Kg ⁻¹ 20 h ⁻¹ | | | | | |
| Pastos nativos: | | ✓ Carbono orgánico. | Sicardi, <i>et al.</i> (2004). | Print, <i>et al.</i> (1989) y Schinner <i>et al.</i> (1996). | Franco arenoso. | Cambio de uso de suelo. |
| Primavera= | 182 µg INTF g ⁻¹ h ⁻¹ | ✓ Respiración del suelo. | | | Mollic Hapludalf. | Tacuarembó, Uruguay. |
| Verano= | 168 µg INTF g ⁻¹ h ⁻¹ | ✓ pH | | | | |
| Invierno= | 103 µg INTF g ⁻¹ h ⁻¹ | | | | | |
| Primavera= | 33 µg INTF g ⁻¹ h ⁻¹ | | | | | |
| Verano= | 83 µg INTF g ⁻¹ h ⁻¹ | | | | | |
| Invierno= | 66 µg INTF g ⁻¹ h ⁻¹ | | | | | |
| Bosques de eucalipto (10 años después de la transformación): | | | | | | |
| Primavera= | 53 µg INTF g ⁻¹ h ⁻¹ | | | | | |
| Verano= | 52 µg INTF g ⁻¹ h ⁻¹ | | | | | |
| Invierno= | 99 µg INTF g ⁻¹ h ⁻¹ | | | | | |
| Primavera= | 16 µg INTF g ⁻¹ h ⁻¹ | | | | | |
| Verano= | 42 µg INTF g ⁻¹ h ⁻¹ | | | | | |
| Invierno= | 42 µg INTF g ⁻¹ h ⁻¹ | | | | | |

Tabla 2.5f – Diferentes valores reportados para la actividad de la deshidrogenasa... (continuación).

| Características del estudio (época del año, uso del suelo, etc.) | Intervalo de valores para la enzima deshidrogenasa. | Propiedades del suelo relacionadas con la enzima deshidrogenasa. | Autor. | Método utilizado. | Tipos de suelo y/o de textura. | Tipo de estudio y localización. |
|--|---|--|-------------------|-------------------|--|---|
| Suelo nativo= | 90 ± 15 µg INTF g ⁻¹ | ✓ Materia orgánica. | García y | García et al. | Franco | Cambio de uso |
| Suelo reforestado= | 141 ± 21 µg INTF g ⁻¹ | ✓ Biomasa microbial. ✓ Respiración basal. | Hernández (1997). | (1993). | arcillosos. Arcillosos. Limoso arcillosos. | de suelo. |
| Bosque nativo. | | Carbono orgánico. | De la Paz et al. | Gong (1996). | Vertic Argiudoll. | Cambio de uso de suelo. |
| Invierno= | 66 ± 10 mg INTF Kg ⁻¹ 24 h ⁻¹ | ✓ pH | | | | |
| Verano= | 51 ± 12 mg INTF Kg ⁻¹ 24 h ⁻¹ | ✓ Nitrógeno total. | | | | |
| Conversión a pastizal. | | ✓ Respiración basal. | | | | |
| Invierno= | 56 ± 11 mg INTF Kg ⁻¹ 24 h ⁻¹ | ✓ Ureasa, | | | | |
| Verano= | 53 ± 7 mg INTF Kg ⁻¹ 24 h ⁻¹ | ✓ Arilsulfatasa. | | | | |
| Suelo bajo cultivo sin labranza (6 años). | 10 ± 3 mg INTF Kg ⁻¹ 24 h ⁻¹ | ✓ β - glucosidasa. | | | | |
| Invierno = | 9 ± 2 mg INTF Kg ⁻¹ 24 h ⁻¹ | | | | | |
| Verano = | | | | | | |
| Suelo bajo cultivo continuo. | | | | | | |
| Invierno = | 4 ± 2 mg INTF Kg ⁻¹ 24 h ⁻¹ | | | | | |
| Verano = | 6 ± 2 mg INTF Kg ⁻¹ 24 h ⁻¹ | | | | | |
| Adición de As (V) (mg/mL) | | | | | | |
| 0= | 524.80 mg INTF Kg ⁻¹ h ⁻¹ | - | Fernandez (2002) | Friedel (1994) | Litosol éútrico de textura media (franco). | Adición de metales pesados a suelos y respuesta de la microbiota. |
| 1= | 568.40 mg INTF Kg ⁻¹ h ⁻¹ | | | | | |
| 2= | 559.53 mg INTF Kg ⁻¹ h ⁻¹ | | | | | |
| 3= | 467.50 mg INTF Kg ⁻¹ h ⁻¹ | | | | | |
| 4= | 283.53 mg INTF Kg ⁻¹ h ⁻¹ | | | | | |
| 5= | 152.05 mg INTF Kg ⁻¹ h ⁻¹ | | | | | |
| 6= | 154.88 mg INTF Kg ⁻¹ h ⁻¹ | | | | | |
| 7= | 57.68 mg INTF Kg ⁻¹ h ⁻¹ | | | | | |

2.5.2.4 Problemas durante la cuantificación de la actividad enzimática.

Las diferentes condiciones en los suelos, en su pretratamiento, y como se ha mencionado al describir y definir las actividades de la β -glucosidasa y deshidrogenasa, las diferentes metodologías usadas para evaluar la actividad de una enzima determinada, llegan a generar resultados contradictorios haciendo imposible comparar los datos obtenidos por diferentes métodos (Gianfreda y Bollag 1996). Nannipieri *et al.* (2002) sugiere un intervalo deseable para la actividad de las enzimas cuantificadas en el presente estudio. Sin embargo, dicho intervalo no es aplicable para el presente estudio, ya que no se menciona el método seguido, ni las condiciones de la muestra (**Tabla 2.5g**).

Por esta razón, se incluyen los posibles orígenes de variaciones en resultados, partiendo de los procedimientos experimentales que pueden afectar la determinación de la actividad enzimática en el suelo (**Tabla 2.5h**) así como los factores que actúan sobre el suelo, como por ejemplo *factores naturales* (pedogenéticos, geográficos, propiedades fisicoquímicas del suelo, y propiedades biológicas como el contenido de materia orgánica, arcilla o la biomasa) o *antropogénicos* (manejo, contaminación ambiental, aditivos tales como fertilizantes, pesticidas, sales y metales pesados). Estos factores en conjunto o por separado, pueden influenciar la producción, actividad, comportamiento catalítico y persistencia de las enzimas en el suelo (Gianfreda y Bollag 1996) (Ver **Tabla 2.5i**).

Tabla 2.5g - Intervalo de actividad enzimática propuesto por Nannipieri *et al.* (2002).

| Enzima | Intervalo | Referencia |
|----------------|---|---|
| Glucosidasa | 0.09-405.00 $\mu\text{mol PNP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ | Ajwa <i>et al.</i> (1999); Serra-Wittling (1995). |
| Deshidrogenasa | 0.003-0.051 $\mu\text{mol INTF g}^{-1} 24 \text{ h}^{-1}$ | Benefield (1977); Trevors (1984). |

Tabla 2.5h – Tipos de alteraciones producidas antes y durante, la determinación de la actividad enzimática (Gianfreda y Bollag 1996).

| Procedimiento | Tipo de alteración. |
|---|--|
| Pretratamiento del suelo. | |
| a) Manejo de la muestra. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Estado y tiempo de secado al aire. ✓ Estado de humedad. |
| b) Almacenamiento. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Temperatura ambiente. ✓ Refrigeración. ✓ Congelación. |
| Esterilización del suelo. | |
| a) Físico. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Esterilización en autoclave. ✓ Calentamiento por vapor. ✓ Secado en horno. ✓ Irradiación. |
| b) Químico. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Uso de bacteriostáticos. ✓ Uso de antibióticos. |
| Condiciones durante el análisis. | |
| a) Tipo, cantidad, estado del sustrato. | |
| b) Buffer utilizado. | |
| c) pH. | |
| d) Temperatura. | |
| e) Duración del análisis. | |
| f) Tiempo de mezcla u homogenización. | |

Tabla 2.5i – Factores que afectan la actividad enzimática del suelo (Gianfreda y Bollag 1996).

| Factores naturales | Factores antropogénicos |
|---|---|
| Factores estacionales y geográficos. <ul style="list-style-type: none"> ✓ Cambios estacionales. ✓ Localización geográfica. ✓ Distribución <i>in situ</i> en el suelo (profundidad). | Contaminantes ambientales. <ul style="list-style-type: none"> ✓ Lluvia ácida. ✓ Presencia de metales pesados. |
| Propiedades fisicoquímicas. <ul style="list-style-type: none"> ✓ Contenido de carbono orgánico. ✓ Nitrógeno total. ✓ Materia orgánica. ✓ Humedad y salinidad. ✓ Tipos de arcilla. ✓ Humus. ✓ Biomasa | Influencia agrícola. <ul style="list-style-type: none"> ✓ Variación en los tipos de sustratos enzimáticos. ✓ Adición de fertilizantes. ✓ Tipo de cobertura vegetal. ✓ Tipo de manejo del suelo. ✓ Adición de pesticidas. |

2.6 Indicadores químicos de degradación del suelo.

El monitoreo de las propiedades químicas brinda información de cambios en la calidad de los suelos bajo actividades agrícolas o forestales y de cómo pueden originar una disminución en su fertilidad del suelo (Hartemink 2003). Comparativamente, pueden cambiar más rápidamente que las propiedades físicas (Norton *et al.* 1999).

Las diferentes propiedades que determinan la calidad química de un suelo están dadas en la **Tabla 2.2a** y algunas de ellas tienen su origen en la *solución o fase líquida* del suelo. En la solución del suelo es donde ocurren la mayor parte de las reacciones químicas, su control, el intercambio de nutrimentos entre la matriz del suelo, las plantas y los microorganismos (Brady 1974).

La *solución del suelo* está conformada por el agua del suelo y las formas iónicas de diferentes nutrimentos disueltas en ella; no es continua y se encuentra limitada y contenida en los espacios porosos (Brady 1974). La solución del suelo es extremadamente variable y es un medio para que se lleve a cabo la nutrición de las plantas y de la microbiota del suelo (Ver **Tabla 2.6a**).

Tabla 2.6a – Importancia de la solución del suelo de acuerdo a Sparks (2003).

Importancia de la solución del suelo.

- ✓ Medio por el cual las plantas y los microorganismos toman iones del suelo.
- ✓ Medio en donde residen los exudados de las plantas.
- ✓ Medio de intercambio iónico por parte de componentes orgánicos e inorgánicos del suelo.
- ✓ Medio de transporte de iones en el suelo.
- ✓ Medio en donde pueden disolverse o liberarse gases a la atmósfera del suelo (fase gaseosa del suelo).
- ✓ Medio en donde se llevan a cabo, y donde interactúan diversas reacciones.

La solución del suelo puede cuantificarse de acuerdo a su reactividad, mediante el pH o a su concentración, mediante la conductividad eléctrica (Smith y Doran 1996; Tan 1996), indicándonos de forma general la naturaleza química de un suelo. Cuando se miden conjuntamente el pH y la conductividad eléctrica, los efectos de las prácticas de manejo y de los sistemas de cultivo sobre la calidad del suelo pueden ser detectados más fácilmente (Smith y Doran 1996).

Los orígenes de las variaciones en las propiedades químicas en el suelo pueden deberse a otro tipo de propiedades; en la **Tabla 2.6b** se enumeran algunas de ellas (Hartemink 2003).

Tabla 2.6b – Orígenes de las variaciones en las propiedades químicas (Hartemink 2003).

| Orígenes físicos | Orígenes biológicos |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ✓ Material parental. ✓ Microrelieve ✓ Tipo de textura ✓ Secuencia de labranza. ✓ Compactación producida por animales de carga o maquinaria pesada. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Fauna del suelo. ✓ Tipo de vegetación. |

2.6.1 pH

La reacción del suelo es definida como el grado de acidez o alcalinidad en los suelos. Se determina mediante la concentración del ion hidrógeno (H^+) en la solución del suelo. En los suelos ácidos se encuentra una mayor cantidad de iones H^+ que de iones OH^+ y en los suelos básicos sucede lo contrario. Para caracterizar la condición ácida, alcalina o neutra, se utiliza el término pH, donde (p) se refiere al logaritmo negativo y (H) a la concentración del ion hidrógeno en la solución del suelo (Tan 1996; Hillel 1998).

$$pH = -\log (H^+) \quad (\text{Fórmula 7})$$

El pH se ha considerado una variable maestra del suelo que es el resultado de un gran número de reacciones químicas y biológicas que ocurren en los suelos (NCR 1993); su importancia radica en que determina la cantidad de nutrientes en solución y su disponibilidad tanto para las plantas como para los microorganismos del suelo (Brady 1974; Sumner *et al.* 1991; USDA 1996; Tan 1998; Sparks 2003).

En las regiones tropicales la acidez del suelo es común, debido a la alta precipitación que genera una lixiviación de cantidades apreciables de bases intercambiables de las capas superficiales del suelo. El porcentaje de saturación de bases es bajo, debido al tipo de partículas que forman el suelo, como lo son el humus y las arcillas de silicatos, resultando en suelos ácidos. Por otra parte, durante la descomposición de la materia orgánica son formados ácidos orgánicos e inorgánicos que también contribuyen a aumentar la acidez de un suelo tropical (Brady 1974).

Se muestra en la **Tabla 2.6c** los diferentes valores de pH y sus características de acuerdo a su acidez o alcalinidad. Para suelos tropicales se observan valores de pH de entre 4 a 6-6.5 (Aguilera 1989; Simth y Doran 1996). En la **Tabla 2.7f** se muestran el intervalo de valores reportados en trabajos anteriores para suelos tropicales.

Tabla 2.6c - Intervalo del pH encontrado en diferentes tipos de suelo de acuerdo a Brady (1974).

| Estado | Característica | Valor del pH. | Tipo de suelo. |
|-----------|-------------------------|---------------|--------------------------------|
| Ácido. | Muy ácido. | < 3 – 4 | Turba |
| | Fuertemente ácido. | 4 – 5 | Suelos en regiones tropicales. |
| | Moderadamente ácido. | 5 – 6 | |
| | Ligeramente ácido. | 6 – 7 | |
| Neutro. | | 7 | Suelos en regiones áridas. |
| Alcalino. | Ligeramente alcalino. | 7 – 8 | |
| | Moderadamente alcalino. | 8 – 9 | |
| | Fuertemente alcalino. | 9 – 10 | |
| | Muy alcalino. | 10 – 11 < | |

El pH del suelo presenta una resistencia a ser modificado, a esta resistencia se le denomina capacidad de amortiguamiento (Brady 1974). En condiciones naturales, el pH es una función de los factores formadores del suelo, y su resistencia a ser modificado es debida al contenido de arcillas y de materia orgánica que actúan como un sistema de amortiguamiento (Tan 1998; Sparks 2003), por esta razón un suelo no varía su pH rápidamente (Ver **Tabla 2.4c**) a menos de que el suelo haya sido sometido durante mucho tiempo a fuertes modificaciones (Brady 1974).

2.6.2 Conductividad eléctrica

La concentración de las sales en el suelo, es una propiedad de la *solución del suelo* cuantificada por la conductividad eléctrica que indica y detecta la cantidad de cationes o aniones (sales minerales) disueltos en el suelo (NCR 1993; USDA 1993, 1996). Cuanto mayor es la cantidad de aniones tanto mayor es la lectura de la conductividad eléctrica. Los iones generalmente asociados con salinidad son Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , H^+ (cationes) ó NO_3^- , SO_4^- , Cl^- , HCO_3^- , OH^- (aniones) (USDA 1993, 1996).

La medición de la conductividad eléctrica es una forma de determinar la salinidad de un suelo. Para suelos tropicales cuya continua lixiviación de sales, debido a un buen drenaje y a una baja capacidad de intercambio catiónico, generan un suelo con una baja conductividad eléctrica menor a 4dS cm^{-1} ó $4000\mu\text{S cm}^{-1}$ (Castro 1996). Por esta razón los valores obtenidos en el presente trabajo serán bajos y las diferencias obedecerán a la alta variabilidad de esta propiedad del suelo (**Ver Tabla 2.4c**).

Algunos valores de la conductividad eléctrica encontrados en suelos tropicales están dados en la **Tabla 2.7f**, y el rango de salinidad de acuerdo a Smith y Doran (1996) están dados en la **Tabla 2.6d**. La conductividad eléctrica es expresada en microSiemens ($\mu\text{S cm}^{-1}$) para suelos con bajos niveles de salinidad y en deciSiemens (dS m^{-1}) para suelos con altos niveles de salinidad (NCR 1993), el factor de conversión entre Siemens y mhos es presentado a continuación:

$$\text{dS m}^{-1} = 1 \text{ mmho cm}^{-1} = 1000 \mu\text{S cm}^{-1}$$

Tabla 2.6d – Grados de salinidad de acuerdo a Smith y Doran (1996) en una solución del suelo.

| Textura | Grados de Salinidad (dS m^{-1}) | | | | |
|------------------------------------|--|---------------------|-----------------------|--------------------|-------------|
| | No salino | Ligeramente salino. | Moderadamente salino. | Fuertemente salino | Muy salino. |
| Guesa a franco arenosa. | 0-1.1 | 1.2-2.4 | 2.5-4.4 | 4.5-8.9 | > 9.0 |
| Franco de arena fina a franco. | 0-1.2 | 1.3-2.4 | 2.5-4.7 | 4.8-9.4 | > 9.5 |
| Franco limoso a franco arcilloso | 0-1.3 | 1.4-2.5 | 2.6-5.0 | 5.1-10.0 | > 10.1 |
| Franco limo arcilloso a arcilloso. | 0-1.4 | 1.5-2.8 | 2.9-5.7 | 5.8-11.4 | > 11.5 |

2.7 Indicadores físicos de degradación del suelo.

Las propiedades físicas que en conjunto forman la *fase sólida* y determinan las fases *líquida* y *gaseosa* (Tan 1998), están dadas en la **Tabla 2.2a**. De acuerdo a Brady (1974), la *textura* y *estructura* del suelo son las propiedades físicas más importantes de la *fase sólida* del suelo debido a que en conjunto regulan el transporte y curso del agua de lluvia, la translocación de los nutrimentos, la actividad faunal y diversidad de especies, la dureza y rigidez del medio de crecimiento para las raíces, así como los procesos de respiración en los suelos (Lal 1994).

La *textura* del suelo es definida como el tamaño de las partículas minerales y su proporción relativa en un suelo determinado (Brady 1974). La *estructura* del suelo es definida como el arreglo de las partículas del suelo y del espacio poroso entre ellas (Marshall 1962, en Marshall *et al.* 1996; Tan 1998; Stott *et al.* 1999).

La degradación de las propiedades físicas originan reducción en la permeabilidad, la aireación, un aumento en la pérdida del mantillo del suelo por inundaciones, se favorece el encostramiento impidiendo o limitando la capacidad del suelo para aceptar, retener y transmitir agua, provee de energía a la microbiota y a las plantas mediante la pérdida de nutrimentos (NCR 1993; Oldeman 1994; Papendick 1994; Håkansson y Voorhees 1997; Lal 1997; Lowery *et al.* 1999; Jim 2003).

2.7.1 Textura

Como se mencionó, la textura de un suelo es definida como el porcentaje relativo de los diferentes tamaños de partículas minerales que constituyen un suelo y su proporción relativa (Brady 1974). La textura es una de las más estables propiedades del suelo, siendo modificada sólo un poco, bajo prácticas de cultivo que causen mezcla de diferentes perfiles (Arshad *et al.* 1996).

La textura del suelo una de las propiedades más importantes de los suelos ya que tiene influencia sobre otras propiedades como la porosidad, la capacidad de retención de humedad, el pH y la capacidad de intercambio catiónico (Siebe *et al.* 1996).

La textura del suelo usualmente es expresada en términos de porcentajes de las partículas inorgánicas que constituyen al suelo: arenas (0.05-2.0 mm), limos (0.002-0.05mm) y arcillas (<0.002mm) en los cuales la composición total equivale a 100% (Arshad *et al.* 1996; Hillel 1998) (Ver **Tabla 2.7a**), partiendo de una muestra del suelo que pasa a través de una malla de 2mm. La fracción dominante es usada para describir la clase de textura del suelo, como por ejemplo arenoso, areno arcilloso, arcillo limoso, y otros. Si no existe una fracción dominante, se le denomina suelo franco (Arshad *et al.* 1996).

Es una propiedad física que cambia únicamente bajo los efectos de los factores formadores del suelo (Ver **Tabla 2.4c**). Usualmente a las arenas y limos se les denomina partículas primarias ya que proceden de la meteorización de la roca madre y a las arcillas como partículas secundarias, derivadas de una segunda secuencia de meteorización (Tan 1998).

Tabla 2.7a - Los tres diferentes tamaños de partículas o fracciones principales del suelo son (Hillel 1998):

| Nombre de la partícula | Tamaño de la partícula. | Características de la partícula. |
|------------------------|---|--|
| ✓ Arena | 2.00 mm (muy gruesa) - 0.05 mm (muy fina) | Procede de la roca madre por efecto de <i>meteorización</i> (efectos externos que alteran las rocas superficiales); la arena silícica es la más típica, por ello se suele expresar el contenido de arena de los suelos en tanto por ciento de sílice (SiO ₂). |
| ✓ Limo | 0.05 mm a 0.002 mm | Fracción intermedia entre la arena y la arcilla; Los limos son granos finos con poca o ninguna plasticidad. |
| ✓ Arcilla | < 0.002 mm | Proceden de silicatos descompuestos de la roca madre. Son principalmente una mezcla de silicatos de aluminio hidratados, los cuales pueden incorporar además hierro, magnesio y potasio. La más típica es la caolinita (sílice, alúmina y agua). La presencia dominante de los silicatos de aluminio es la razón de que el contenido en arcilla de los suelos sea expresada en tantos por ciento de óxido aluminico o alúmina (Al ₂ O ₃). |

Diferentes tipos de texturas de los suelos se han reportado para la región de los Tuxtlas, Veracruz. Algunas de ellas son mencionadas en la **Tabla 2.7f** y corresponden a trabajos de Toledo *et al.* (1972), Aguilar (1988), Castro (1996) y Sommer-Cervantes *et al.* (2004).

2.7.2 Densidad del suelo.

La densidad del suelo se divide en dos diferentes tipos: *densidad aparente* y *densidad real* y es una medida donde se expresa la cantidad de suelo dependiente, tanto del contenido mineral, del contenido de materia orgánica y del espacio poroso o porosidad del suelo (Tan 1996).

La *densidad aparente* es definida como la relación entre la masa del suelo y su volumen total esto es, incluyendo los espacios porosos (Brady 1974; Cambell y Henshall 1991; USDA 1993, 1996; Grossman y Reinsch 2002).

La densidad aparente está relacionada con la estructura del suelo (NCR 1993) y es altamente lábil. Los factores que afectan la densidad aparente son los sistemas de cultivo y las prácticas de manejo, como la labranza, compresión por animales, maquinaria agrícola, etc., las cuales favorecen el grado de compactación e incrementan los valores de densidad aparente (Brady 1974; NCR 1993; Lal 1994, 1997a; Arshad *et al.* 1998; Hillel 1998; Lal *et al.* 1999; Doran *et al.* 1999).

La pérdida del contenido de materia orgánica de los suelos también aumenta la densidad aparente de un suelo (NCR 1993) debido a que a mayor cantidad de materia orgánica la densidad aparente es menor y viceversa. La densidad también es una propiedad dependiente de la textura, siendo menor cuando la fracción arcillosa es mayor (Jim 2003), por esta razón es un indicador de la compactación y de las restricciones al crecimiento de las raíces (NCR 1993; Arshad *et al.* 1996). La densidad aparente, también es un indicador potencial para elaborar modelos de lixiviación, productividad y erosividad (Doran *et al.* 1999).

En la **Tabla 2.7b** se presentan los valores deseables para tener favorables condiciones físicas en el suelo. Los valores para las selvas altas perennifolias, sistemas agroforestales, así como para maizales son mencionados en la **Tabla 2.7f**.

Tabla 2.7b – Intervalo de valores para la densidad aparente de acuerdo a Brady (1974)¹ y Tan (1996)².

| Intervalo de valores de la <i>densidad aparente</i> . | | Valor de compactación. ² | Condición del suelo. ² | Tipo de suelo. ² |
|---|------------------------------|-------------------------------------|--|---|
| (1) | (2) | | | |
| 1 – 1.6 g cm ⁻³ | 1 – 1.5 g cm ⁻³ | Bajo | Favorable condición física, | Suelos arcillosos, franco arcillosos, franco limosos. |
| 1.2 – 1.8 g cm ⁻³ | 1.8 – 2.0 g cm ⁻³ | Alto | Pobre condición física para el crecimiento de las plantas. | Arenosos, franco arenosos. |
| > 2 g cm ⁻³ | - | Muy alto | - | - |

La *densidad real* es usualmente definida como la masa de una unidad de volumen del suelo sin considerar el espacio poroso y es también llamada la *densidad de las partículas* (Brady 1974).

Los valores de la *densidad real* son dependiente de las densidades de las partículas que conforman el suelo: arena, limo, arcilla y materia orgánica (USDA 1996, Hillel 1998).

Los suelos minerales normalmente tienen un intervalo de valores de densidad observado entre 2.6 g cm⁻³ y 2.75 g cm⁻³ debido a la gran cantidad de partículas de cuarzo, feldespatos y silicatos las cuales tienen altas densidades. Los suelos con un alto contenido de materia orgánica, normalmente tienen densidades de partículas que van de 1.2 g cm⁻³ a 1.5 g cm⁻³; sin embargo es aceptado para realizar cálculos en las superficies de suelos, una media de 2.65 g cm⁻³ (Brady 1974).

Los factores formadores del suelo son quienes alteran el tamaño de las partículas del suelo (Tan 1998), por esta razón se requiere de un gran periodo de tiempo para que se afecte el tamaño de las partículas del suelo (Ver **Tabla 2.4c**).

Los intervalos de valores para la densidad real están representados en la **Tabla 2.7c** para suelos con bajos y altos contenidos de materia orgánica. Los valores reportados para la densidad real en diferentes suelos de Veracruz, están dados en la **Tabla 2.7f**.

Tabla 2.7c– Intervalo de valores de la densidad real de acuerdo a Brady (1974).

| Intervalo de valores de la <i>densidad real</i> o <i>densidad de las partículas</i> . | Tipo de suelo. |
|---|--|
| $< 2.4 \text{ g cm}^{-3}$ | Suelos con alto contenido de materia orgánica. |
| $2.60 \text{ g cm}^{-3} - 2.75 \text{ g cm}^{-3}$ | Suelos con bajo contenido de materia orgánica. |

2.7.3 Porcentaje de porosidad.

El término porosidad se define como el volumen del espacio poroso, cuantificado como un porcentaje. La porosidad es un índice del espacio relativo de los poros en un suelo (USDA 1993), el cual se obtiene relacionando la densidad aparente y la densidad real. Este valor varía dentro del intervalo del 30 y 60%. Sin embargo, mientras más fina es la fracción mineral (arcillas), mayor será la cantidad de poros presentes. En suelos con alto contenido de materia orgánica y en suelos derivados de cenizas volcánicas, se observan altos valores de porosidad, de entre 70% y 80% (Hillel 1998).

El arreglo, tamaño, distribución y continuidad del espacio poroso promueve diferentes funciones en un suelo; determina, por ejemplo, el flujo o movimiento del agua y aire, afectando tanto la fase líquida o solución del suelo y la fase gaseosa (Marshall *et al.* 1996). Los poros más pequeños suelen contener agua y los mayores, aire. La forma y continuidad de los poros de mayor tamaño determinan en gran parte las condiciones de aireación del suelo así como del crecimiento de la planta. Lo deseable es que la fracción porosa esté ocupada en 2/3 partes por agua y 1/3 parte por aire. Cuando los suelos son ricos en arcilla y bajos en materia orgánica, pueden almacenar tanta agua que presentan dificultades de aireación, en cambio, en los suelos arenosos el agua pasa con demasiada rapidez y al no retenerla, dificulta el crecimiento de las plantas (Thompson y Troeh 1982).

Los poros son necesarios en el suelo para el almacén y transmisión tanto del agua como del aire en el suelo, así como para el crecimiento de las raíces (Stott *et al.* 1999). Procesos relacionados a la pérdida o reducción de las propiedades químicas y biológicas del suelo, tienen su origen en la pérdida o cambios en la porosidad, por ejemplo: se puede impedir la infiltración y la aireación limitando la disponibilidad de nutrientes para las plantas o el intercambio de gases en el suelo. Los procesos implicados en la reducción del espacio poroso y aumento en la densidad son: la compactación, encostramiento, reducción en la aireación e infiltración, cambios en la solución del suelo, y un aumento en la erosión (Marshall *et al.* 1996).

El intervalo de valores del porcentaje de porosidad son presentados en la **Tabla 2.7d** de acuerdo al tipo de textura del suelo. Los valores reportados para el porcentaje de porosidad del suelo están dados en la **Tabla 2.7f**.

Tabla 2.7d – Intervalo de valores del porcentaje de porosidad de acuerdo a Brady (1974), Tan (1996) y Hillel (1998)¹

| Tipo de suelo | Porcentaje de porosidad. |
|--|--------------------------|
| Subsuelo compactado | 25 %-30 % |
| Arenoso | 35 %-50 % |
| Arcillosos y Limosos | 40 %-60 % |
| Suelos derivados de cenizas volcánicas. ¹ | 60 %-80 % |

Tabla 2.7f - Intervalos de valores reportados para: porcentaje de carbono orgánico (propiedad biológica), densidad real, densidad aparente, textura, porcentaje de porosidad (propiedades físicas), conductividad eléctrica y pH (propiedades químicas).

| Características del estudio (época del año, uso del suelo). | Densidad aparente. $g\ cm^{-3}$ | Densidad ad real. $g\ cm^{-3}$ | C org. (%) C^a | C.E. $\mu S\ cm^{-1}$ | Porosidad. (%) | pH | Tipo de suelo. | Autor | Tipo de estudio y localización. |
|--|---------------------------------|--------------------------------|------------------|-----------------------|----------------|------|-----------------|------------------------------|---|
| Suelo de selva tropical húmeda. | | | | | | | | Toledo <i>et al.</i> (1972). | Estudio social y cambios de uso de suelo. Veracruz, México. |
| -- años= | 0.55 | - | - | - | - | 6.85 | Franco arenoso. | | |
| 20 años= | 0.90 | | | | | 6.21 | | | |
| Suelo bajo vegetación secundaria (acahual): | | | | | | | | | |
| 4 años= | 0.71 | - | - | - | - | 6.80 | Franco arenoso. | | |
| 0.75 años= | 0.84 | | | | | 6.45 | | | |
| 1.17 años= | 0.80 | | | | | 7.20 | | | |
| Suelo bajo cultivo de maíz y arroz: | | | | | | | | | |
| 4 años= | 1.05 | - | - | - | - | 6.80 | Franco arenoso. | | |
| 8 años= | 0.76 | | | | | 6.50 | | | |
| 17 años= | 0.78 | | | | | 6.49 | | | |
| 25 años= | 0.85 | | | | | 6.50 | | | |
| Vegetación original: selva alta perennifolia. Uso actual: cultivo de café. | | | | | | | Inceptisol. | | Descripción de suelos. Chiapas, México. |
| 0-10cm= | 0.70 | 2.38 | 8.70 | - | 70.58 | 5.6 | Franco arenoso. | Aguilera (1989). | |
| 10-20cm= | 0.83 | 1.85 | 3.30 | | 55.1 | 5.4 | Franco arenoso. | | |
| 20-30cm= | 1.17 | 2.27 | 0.51 | | 48.4 | 5.7 | Franco arenoso. | | |
| Bosque caducifolio con cultivo de café, aguacate y vainilla. | | | | | | | Andisol. | | Descripción de suelos. Veracruz, México. |
| 0-40cm= | 0.76 | - | - | - | - | - | | Aguilera (1989). | |

Tabla 2.7f - Intervalos de valores reportados para las propiedades biológicas, físicas y químicas... (continuación).

| Características del estudio (época del año, uso del suelo). | Densidad aparente. $g\ cm^{-3}$ | Densidad ad real. $g\ cm^{-3}$ | C org. (%) C_a | C.E. $\mu S\ cm^{-1}$ | Porosidad. (%) | pH | Tipo de suelo. | Autor | Tipo de estudio y localización. |
|---|---------------------------------|--------------------------------|------------------|-----------------------|----------------|-----|--------------------------|-------------------------|---------------------------------|
| Vegetación original: Selva mediana subperennifolia. | | | | | | | H ₂ O (1:2.5) | KCl (1:2.5) | |
| Uso actual: cultivo de maíz. | | | | | | | | | Molisol. |
| 0-10cm= | 1.01 | 2.27 | 3.12 | 580 | 55.5 | 6.3 | 6.3 | 5.5 | Frango arcilloso. |
| 10-20cm= | 1.15 | 2.57 | 1.79 | 500 | 55.2 | 7.1 | 5.2 | 5.6 | Frango arcillo arenoso |
| 20-30cm= | 1.05 | 2.37 | 1.49 | 300 | 55.7 | 6.3 | 5.1 | 4.8 | Arcillo arenoso. |
| Vegetación original: Selva mediana subperennifolia. | | | | | | | H ₂ O (1:2.5) | KCl (1:2.5) | |
| Uso actual: cultivo de maíz. | | | | | | | | | Ultisol. |
| 0-10cm= | 1.16 | 2.07 | 3.48 | - | 43.76 | 6.0 | 6.0 | 5.0 | Frango arenoso. |
| 10-20cm= | 1.37 | 2.44 | 1.16 | | 43.89 | 5.2 | 5.2 | 3.9 | Frango arcillo arenoso |
| 20-30cm= | 1.39 | 2.43 | 0.63 | | 42.58 | 5.1 | 5.1 | 3.7 | Frango arcillo arenoso |
| Perfil 10. | | | | | | | H ₂ O (1:5) | CaCl ₂ (1:5) | |
| 0-27cm= | 0.90 | 2.40 | 6.4 | - | 60.80 | 6.2 | 6.2 | 5.4 | Andosol |
| 27-39= | 0.80 | 2.40 | 5.0 | | 67.10 | 6.3 | 6.3 | 5.6 | |
| Perfil 11. | | | | | | | | | |
| 0-28= | 1.00 | 2.30 | 4.1 | | 59.40 | 6.5 | 6.5 | 5.6 | |
| 28-46= | 0.80 | 2.30 | 3.1 | | 64.00 | 6.5 | 6.5 | 5.5 | |
| Perfil 4. | | | | | | | H ₂ O (1:5) | CaCl ₂ (1:5) | |
| 0-20cm= | 0.80 | 2.40 | 1.9 | - | 63.40 | 5.7 | 6.6 | 4.9 | Cambisol |
| 20-40= | 0.90 | 2.30 | 1.5 | | 56.50 | 6.6 | 6.6 | 5.3 | |

Caracterización de suelos. Veracruz, México.

Caracterización de suelos. Veracruz, México.

Tabla 2.7f - Intervalos de valores reportados para las propiedades biológicas, físicas y químicas... (continuación).

| Características del estudio (época del año, uso del suelo). | Densidad aparente. $g\ cm^{-3}$ | Densidad ad real. $g\ cm^{-3}$ | C org. (%) C_a | C.E. $\mu S\ cm^{-1}$ | Porosidad. (%) | pH | Tipo de suelo. | Autor | Tipo de estudio y localización. |
|---|---------------------------------|--------------------------------|-------------------|-----------------------|----------------|------------------------|-------------------------|---------------------------------|--|
| Perfil 5. | | | | | | H ₂ O (1:5) | CaCl ₂ (1:5) | | |
| 0-5cm= | 0.80 | 2.00 | 3.2 | - | 60.80 | 5.9 | 5.3 | Sommer-Cervantes et al. (2003). | Caracterización de suelos. Veracruz, México. |
| 5-30= | 0.90 | 2.40 | 1.8 | | 67.10 | 5.8 | 5.1 | | |
| Perfil 7. | | | | | | | | | |
| 0-5= | 1.00 | 2.40 | 3.8 | | 59.40 | 6.3 | 5.8 | | |
| 5-30= | 1.00 | 2.50 | 0.8 | | 64.00 | 6.3 | 5.3 | | |
| Perfil 1. | | | | | | H ₂ O (1:5) | CaCl ₂ (1:5) | | |
| 0-10cm= | 0.70 | 2.00 | 3.9 | - | 58.10 | 6.7 | 5.8 | Sommer-Cervantes et al. (2003). | Caracterización de suelos. Veracruz, México. |
| 10-20= | 0.90 | 2.20 | 2.5 | | 54.20 | 6.1 | 5.4 | | |
| Perfil 2. | | | | | | | | | |
| 0-10= | 0.80 | 2.20 | 3.7 | | 57.70 | 5.6 | 5.0 | | |
| 10-30= | 0.80 | 2.20 | 2.3 | | 57.90 | 5.8 | 5.1 | | |
| Perfil 3. | | | | | | | | | |
| 0-35= | 0.90 | 2.30 | 1.0 | | 55.10 | 5.8 | 4.8 | | |
| Perfil 6. | | | | | | H ₂ O (1:5) | CaCl ₂ (1:5) | | |
| 0-7cm= | 0.60 | 2.00 | 3.5 | - | 58.3 | 5.9 | 5.4 | Sommer-Cervantes et al. (2003). | Caracterización de suelos. Veracruz, México. |
| 7-25cm= | 1.00 | 2.40 | 2.4 | | 51.1 | 5.4 | 4.9 | | |
| Pastizal inducido. | | | | | | | | | |
| 0-20cm= | 0.71 | 2.67 | 5.75 ^a | | | H ₂ O (1:1) | KCl (1:1) | Castro (1996) | Descripción, dinámica y formación de suelos. Veracruz, México. |
| 20-30cm= | 0.75 | 2.75 | 2.85 ^a | | | 6.8 | 5.8 | | |
| | | | | | | 7.3 | 6.5 | | |
| Bosque tropical | | | | | | | | | |
| deciduo. | | | | | | H ₂ O (1:1) | KCl (1:1) | Castro (1996). | Descripción, dinámica y formación de suelos. Oaxaca, México. |
| 0-33cm= | 1.32 | - | 1.05 | | | 5.9 | 5.0 | | |
| 33-45cm= | 1.32 | | 0.89 | | | 5.2 | 4.8 | | |

3 JUSTIFICACIÓN

La degradación antropogénica de los suelos en la región de los Tuxtlas es provocada por el cambio de uso de suelo. La selva alta perennifolia (Miranda y Hernández-X 1963, en Rzedowski 1978) es talada para utilizar los suelos con fines productivos. En principio, las zonas forestales de los trópicos se dedican a la agricultura solamente durante un par de años, después de finalizado su uso agrícola son abandonadas y usadas como potreros (Carabias *et al.* 1994).

El cambio en el uso del suelo puede degradar su calidad (NRC 1993), y por consiguiente, las dos funciones más importantes que el suelo lleva a cabo: el mantener la productividad y su capacidad de regulación ambiental (NRC 1993; Lal 1999).

La selva alta perennifolia, como todo sistema natural, posee la capacidad de regenerarse (Toledo *et al.* 1972), sin embargo, como consecuencia del uso productivo intensivo de los suelos tropicales, se imposibilita la regeneración natural y el suelo va perdiendo así sus propiedades físicas, químicas y biológicas que son, en conjunto, la base de la calidad del suelo y de las funciones que lleva a cabo dentro del ecosistema.

Es necesario determinar los diferentes impactos que tiene la actividad antropogénica en las propiedades del suelo, dependiendo del tipo de manejo que se le dé, para así plantear estrategias de manejo que impidan la degradación progresiva del suelo, identificando aquellas propiedades clave, dado que no todas las propiedades del suelo son modificadas de igual forma bajo diferentes usos de suelo.

En este estudio se evalúan los indicadores de degradación, o propiedades clave, del suelo de acuerdo a Doran y Parkin (1994, en Gil-Sotres *et al.* 2005) y Karlen *et al.* (1997) bajo cuatro diferentes usos del suelo: (1) Selva alta perennifolia, (2) maizales, (3) pastizales y (4) sistemas agroforestales, los cuales incluyen cafetales y cafetales acahualados, es decir, cafetales que han sido abandonados y que presentan vegetación secundaria, para determinar las variaciones que tienen estas propiedades del suelo usadas como indicadores de degradación tras la transformación de la cobertura vegetal original y bajo diferentes prácticas de manejo.

4 HIPÓTESIS

- a) Los cambios en la cobertura vegetal y en el manejo del suelo de (1) selva alta perennifolia a (2) maizales, (3) pastizales o (4) sistemas agroforestales (cafetales y cafetales acahualados), originarán cambios en determinados indicadores de degradación del suelo tanto físicos (densidad aparente), químicos (conductividad eléctrica), como biológicos (porcentaje de carbono orgánico y actividad enzimática), respecto a los suelos no perturbados.
- b) Se esperan cambios de forma más evidente en los indicadores biológicos de degradación de los suelos, tales como el porcentaje de carbono orgánico y la actividad enzimática, respecto a los indicadores físicos y químicos debido a su alta sensibilidad a los cambios en el uso del suelo, así como a la remoción y transformación de la cobertura vegetal; cambios que se esperan más drásticos en los sitios bajo uso agrícola.
- c) Los indicadores físicos como la densidad aparente y el porcentaje de porosidad tendrán cambios perceptibles, originados por un aumento en la compactación y por la pérdida de materia orgánica siendo este cambio más evidente en los sitios de maizales y pastizales.
- d) La conductividad eléctrica en su papel de indicador químico, presentará diferencias debido a que es una propiedad altamente variable a lo largo del tiempo (< 1 año).
- e) La textura y la densidad real no serán dependientes del uso del suelo, debido a que son propiedades que cambian sólo bajo procesos de formación de suelos (>10³ años).

- f) El pH, indicador químico, no presentará variaciones respecto a los suelos no perturbados dado que posee una capacidad autorreguladora y autoamortiguadora, siendo una característica más estable en el tiempo (>10 años).

5 OBJETIVOS

5.1 Objetivo general.

- Determinar los valores de los indicadores de degradación de tipo biológicos (materia orgánica, actividad enzimática), químicos (pH y conductividad eléctrica) y físicos (textura, densidad real, aparente y porcentaje de porosidad), y determinar bajo 4 diferentes usos de suelo en qué tipo de actividad antropogénica se observa un mayor grado de degradación del suelo respecto a la vegetación original (selva alta perennifolia).

5.2 Objetivos particulares.

- Determinar cuales indicadores de degradación resultan más afectados por el cambio de uso del suelo.
- Determinar cuál o cuales usos de suelo antropogénico presenta un mayor número de variación en los indicadores de degradación respecto a la selva alta perennifolia.
- Determinar los efectos de 4 usos de suelo diferentes en la actividad biológica del suelo a través de la actividad enzimática.

6 ZONA DE ESTUDIO

6.1 Localización

El Ejido San Fernando, perteneciente al Municipio de Soteapan, Veracruz (González 1991) está asentado en una cadena montañosa llamada la Sierra de los Tuxtlas, formada por la sierra de Santa Marta, el volcán San Martín Pajapan y al volcán San Martín Tuxtla (Gómez-Pompa *et al.* 1979, en González 1991) (Ver **Mapas 6.1a** y **6.1b**).

La altitud del Ejido San Fernando va desde los 600 hasta los 800 msnm (INEGI 1984a). Se encuentran tres ríos de tipo permanente en la zona cercana al Ejido: el Tatahuicapa, el Texizapa y el Huazuntlan.

De acuerdo a Cruz y Cruz (1992) las actividades económicas principales en el Municipio de Soteapan son el cultivo de maíz, café, árboles frutales y en menor medida, la producción de miel.

El Ejido San Fernando es uno de los tres Ejidos que han sido sujetos de estudio del proyecto GEF y presenta un 50% de cobertura vegetal natural. En la **Tabla 6.1a** se presenta el porcentaje actual correspondiente a la selva alta perennifolia (Miranda y Hernández-X 1963, en Rzedowski 1978) en los tres Ejidos seleccionados. El porcentaje de cobertura vegetal actual en estos ejidos es claro reflejo de cómo las selvas tropicales han sido destruidas de manera extensiva en el país. La deforestación y perturbación es el resultado de la apertura de estas áreas a la producción agrícola y ganadera, lo cual acelera varios procesos de degradación en los suelos.

Tabla 6.1a- Nombre de ejidos, porcentaje de cobertura vegetal (de acuerdo al Proyecto GEF) y localización geográfica (INEGI 1984b).

| EJIDO | López Mateos | San Fernando | Venustiano Carranza |
|--|---------------------|--------------------------------|----------------------------|
| Porcentaje de cobertura vegetal original. | 75 % | 50 % | 25 % |
| Localización. | 18°27' 94°57' | 18°16' 94°53' | 18°21' 94°45' |

6.2 Edafología

El Ejido San Fernando está asentado sobre rocas ígneas producto de una gran actividad volcánica en el periodo Terciario durante el Pío-Pleistoceno (Ríos-Macbeth 1952).

La carta edafológica INEGI (1984) reporta para la sierra de Santa Martha y el volcán San Martín Pajapan, siete diferentes tipos de suelos: vertisoles, luvisoles, cambisoles, andosoles, acrisoles, regosoles y gleysoles. El Ejido San Fernando está asentado entre suelos de los tipos vertisol y luvisol (INEGI 1984), este último también llamado Lixisol (L. lix= lavado), caracterizados por materiales parentales aún con niveles de minerales intemperizables de moderados a altos, se acumulan superficialmente partículas arcillosas de baja actividad y tienen una saturación de bases de moderada a alta (Sommer-Cervantes *et al.* 2003).

Los luvisoles se localizan en regiones tropicales o subtropicales con estación seca, así como en las partes más cálidas de los climas templados y en áreas con frecuentes depósitos de polvos incorporados por vía aérea, sobre superficies pleistocénicas o más antiguas (Sommer-Cervantes *et al.* 2003).

Los vertisoles por su parte, son suelos ricos en arcilla (Thompson y Troe 1982) de complejos organo-minerales muy estables y de color oscuro; integración del hierro procedente de la alteración en las arcillas de neoformación y en los complejos húmicos muy polimerizados (Duchaufour 1984, en Pedraza-Gilsanz *et al.* 1996).

6.3 Clima

De acuerdo con datos para la región del Volcán Santa Martha (González 1991) el tipo de clima en el Ejido San Fernando corresponde a un cálido húmedo (Am) con lluvias abundantes en verano, e influencia de monzón. La precipitación del mes más seco es menor de 60 mm.

La temperatura media anual varía entre los 22-24 °C, una mínima extrema entre los 12-14°C, una máxima extrema entre los 32-34°C y una precipitación anual entre 2500-3000 mm.

Las cuatro estaciones meteorológicas cercanas al Ejido San Fernando (**Tabla 6.3a**), denotan las precipitaciones más bajas entre enero y febrero, fecha en que se llevó a cabo el muestreo (datos no mostrados). De acuerdo a la regionalización climática propuesta por González (1991), el tipo de clima reportado para el Ejido San Fernando es el propuesto para la estación meteorológica de Catemaco.

Tabla 6.3a – Estaciones meteorológicas con al menos, de 19 a 21 años de registros, cercanas al Ejido San Fernando; (*) Presentan el mismo tipo de clima según el sistema de Köppen modificado por García (1964, en González 1991).

| ESTACIÓN | Latitud | Longitud | Tipo de Clima |
|-------------------|---------|----------|--------------------------|
| 019 Catemaco* | 18°38' | 95°28' | Am (e)gw'' |
| 105 San Juan Seco | 18°02' | 95°09' | Aw ₂ (i')gw'' |
| 038 Huazuntlan | 18°10' | 94°47' | Aw ₂ (i')gw'' |
| 029 Coyame | 18°24' | 95°01' | Af(m)(i')gw'' |

Ver mapas adelante.

Mapa 6.1a – Mapa altimétrico 1: 150,000 de la Sierra de los Tuxtles (volcanes San Martín y Santa Martha), se muestran los tres ejidos donde se llevó a cabo el proyecto GEF: San Fernando, López Mateos y Venustiano Carranza (INEGI 1984b).

Ver mapas adelante.

Mapa 6.1b – Mapa de grados de pendientes 1: 30,000 del Ejido San Fernando; se muestran los sitios donde se llevó a cabo el muestreo (algunos sitios de selva no pudieron ser georeferenciados) (INEGI 1984b).

6.4 Tipos de vegetación.

6.4.1 Selva alta perennifolia.

La vegetación original o vegetación clímax presente en el Ejido San Fernando, es la selva alta perennifolia (Miranda y Hernández-X. 1963, en Rzedowski 1978) distribuida por encima de los 600 hasta los 700 msnm (INEGI 1984b; González 1991). La selva alta perennifolia (Miranda y Hernández-X. 1963, en Rzedowski 1978) es un ecosistema de gran complejidad y extraordinaria biodiversidad, también llamado “*tropical rain forest*”, “*ever green rain forest*” (Leopold 1950, en Rzedowski 1978).

Respecto a esta extraordinaria biodiversidad, Carabias (1980) reporta un total de 116 especies de plantas vasculares en un área de 2 km² mayores a 0.5 m para este tipo de vegetación en la Estación Biológica de los Tuxtlas, Veracruz. Las especies, por estrato, con un mayor índice de dominancia en la selva alta perennifolia de la Estación de Biología de los Tuxtlas son presentados en la Tabla 6.4a.

Tabla 6.4a – Especies dominantes por estrato para una selva alta perennifolia en la Estación Biológica de los Tuxtlas, Veracruz, de acuerdo a Carabias (1980).

| | Intervalo del estrato. | Especies dominantes. |
|-----------|------------------------|--|
| Estrato 1 | 0 – 5.51 m | <i>Astrocaryum mexicanum</i> , <i>Chamaedorea</i> sp., <i>Acalypha skutchii</i> . |
| Estrato 2 | 5.51 – 10.50 m | <i>Trophis racemosa</i> , <i>Annona glabra</i> , una especie de la familia <i>Annonaceae</i> , <i>Cymbopetalum baillonii</i> , <i>Pseudolmedia oxyphyllaria</i> y <i>Guarea bijuga</i> . |
| Estrato 3 | 10.51 – 20.50 m | <i>Dendropanax arboreus</i> , <i>Nectandra salicifolia</i> , <i>Cymbopetalum baillonii</i> , <i>Crateava tapia</i> y <i>Poulsenia armata</i> . |
| Estrato 4 | 20.51 – 35 m | <i>Nectandra salicifolia</i> , <i>Nectandra ambigens</i> , <i>Dendropanax arboreus</i> , una especie llamada localmente “pochote”, <i>Picus tecolutensis</i> y <i>Stemmadenia donell-smithii</i> . |

Ibarra-Manriquez (1985), por su parte reporta seis tipos de especies arbóreas que comúnmente alcanzan el dosel de la selva: *Ficus insipida*, *Poulsenia armata*, *Lonchocarpus guatemalensis*, *Cordia megalantha*, *Pterocarpus rohrii* y *Omphalea oleifera* y especies arbóreas de menor talla como lo son *Pseudolmedia oxiphyllaria*, *Stemmadenia donell-smithii*, *Guarea glabra*, *Pouteria drlandii* y *Dendropanax arboreus*.

La secuencia tradicional de manejo del suelo en el Ejido San Fernando sigue un patrón básico descrito por Guevara *et al.* (1997), en donde la primera acción después de la remoción de la vegetación original de un sitio de selva, es el cultivo de maíz, seguido del pastoreo y/o la conversión a otros sistemas de cultivo como el de café (**Figura 6.4a**)

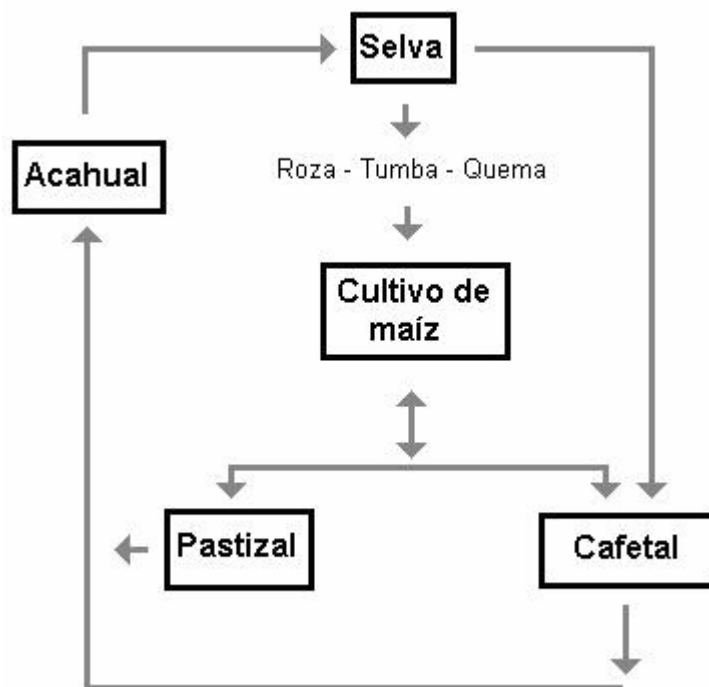


Figura 6.4a – Secuencia de transformación de uso de suelo modificado de Guevara *et al.* (1997) para el Ejido San Fernando.

6.4.2 Maizales.

Los cultivos bajo laboreo continuo corresponden a maizales (**Tabla A.1.2, Anexo 1**), de diferentes edades, de entre 10 y 40 años de explotación; seis de ellos con periodos de barbecho variables de entre 1 y 5 años, así como dos sitios sin barbecho.

El *barbecho* es un periodo de descanso del suelo en el cual cesan las actividades productivas. De acuerdo a Plaster (1997), en lugares con marcadas temporadas de lluvia a lo largo del año, el barbecho se lleva a cabo en verano para retener el agua de lluvia y mantener las condiciones de humedad del suelo. En el caso de las regiones tropicales, el fin del barbecho es evitar y/o retardar la pérdida productiva del suelo. En muchas ocasiones, el barbecho favorece un proceso de sucesión originando un tipo de vegetación secundaria denominada *acahual* (Ver **Figura 6.4b** y Sección 6.4.4.1).

El método común de desmonte en las regiones tropicales es el de roza-tumba y quema, conjuntamente con la quema de residuos orgánicos después de la cosecha. Warman *et al.* (1982) definen para el área norte de Veracruz y el centro de Chiapas un tipo de sistema de cultivo de maíz de temporal denominado: *intensivo de temporal*. Cuyas características principales son la ausencia de barbecho, este concepto concuerda con al menos dos de los sitios muestreados (SF35M y SF39M), y la dependencia exclusiva de la precipitación pluvial para el riego de los cultivos; sin embargo, este sistema de cultivo de maíz no es totalmente aplicable al Ejido San Fernando dado que para denominarse *intensivo de temporal* se requiere de maquinaria pesada para el arado y labranza del área de cultivo.

De acuerdo a Warman (1982), para el resto de los sitios muestreados (SF2M, SF4M, SF5M, SF36M, SF37M y SF38M) el cultivo *no es intensivo* debido a que presentan aceptables tiempos de barbecho (1-5 años). No se tiene información de la o las variedades de maíz cultivadas en el Ejido San Fernando.

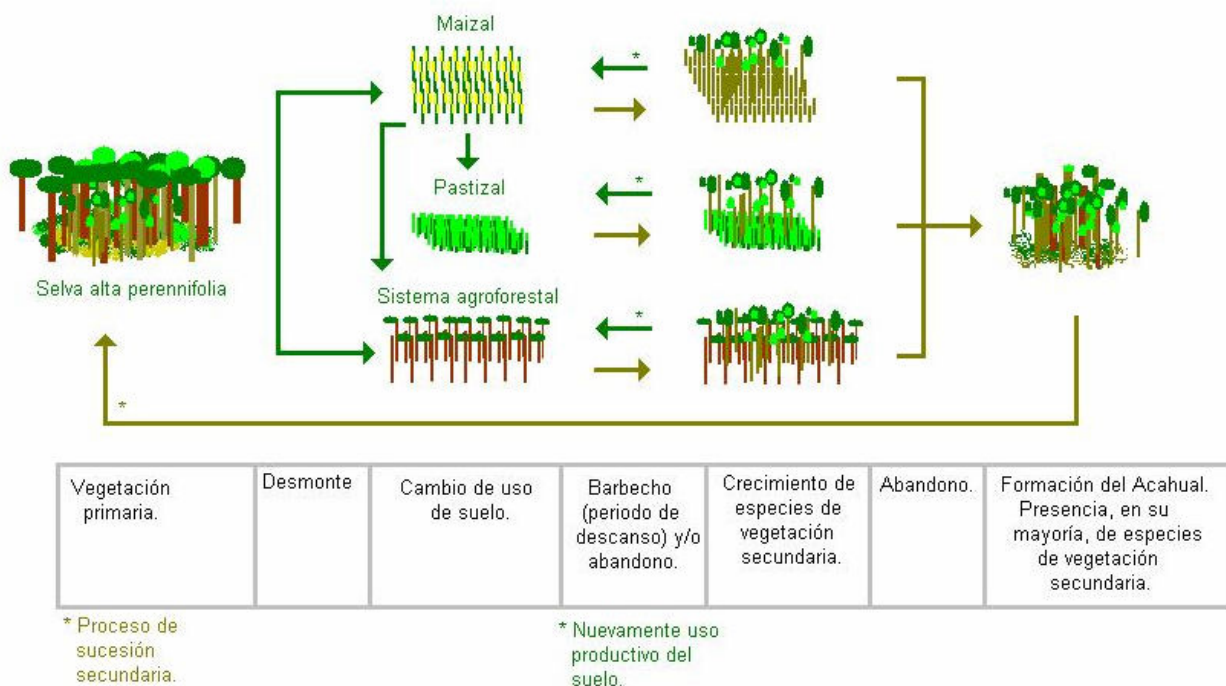


Fig 6.4b – Formación del acahual a partir de tres usos productivos del suelo: maíz, pastizal y sistemas agroforestales (cultivo de café).

6.4.3 Pastizales.

Los pastizales han sido introducidos en las regiones tropicales para el forrajeo de ganado vacuno, siendo el pasto “estrella” (*Cynodon plectostachyus*) también llamado “estrella mejorada” o “estrella de África mejorada” (Lira 2003), el usado en siete de los ocho sitios muestreados. En siete sitios se han utilizado fertilizantes con un barbecho de siete años, siendo usados como pastizales desde hace 20 años (**Tabla A.1.3, Anexo 1**).

De acuerdo a Martínez (1980, en Lira 2003), el proceso de introducción de pasto para la alimentación del ganado comienza después de haber cosechado el maíz aprovechando los residuos orgánicos de las plantas de maíz.

Lira (2003) reporta un total de 215 especies agrupadas en 54 familias, 201 angiospermas y 14 pteridofitas en potreros del norte de Veracruz; igualmente menciona que la riqueza y composición florística del pastizal es un determinante en la productividad del mismo, en donde las alteraciones generadas por el ganado en el pastizal durante el forrajeo y el pastoreo, modifican tanto su riqueza como su composición florística.

6.4.4 Sistemas agroforestales-acahuales.

En el presente trabajo se presentan dos tipos de *sistemas agroforestales*: (**Tabla A.1.4, Anexo 1**) el primero corresponde a cafetales y el segundo a cafetales que han sido abandonados, los cuales incluyen vegetación secundaria conocida como acahual.

6.4.4.1 Cafetal.

Se ha considerado al *cafetal* como un cultivo perenne que tiene importancia en el mantenimiento de la calidad de un suelo en las zonas cálido-húmedas y subhúmedas. Presenta características que lo asemejan a un ecosistema natural, con una buena estructuración que protege al suelo de la erosión, propicia la acumulación de materia orgánica y contribuye al mantenimiento de la estabilidad del ecosistema (Cruz 1992).

La región cafetalera de Veracruz presenta relieve accidentado en donde la mayor parte de los suelos son de origen volcánico (particularmente cenizas), muchos de ellos con reacción ácida. En algunas áreas reducidas existen suelos derivados de materiales sedimentarios calcáreos (Cruz 1992).

Las prácticas agrícolas empleadas en el Ejido San Fernando son de tipo rústico (**Tabla A.1.4, Anexo 1**) usándose como árboles de sombra especies de la selva alta perennifolia. Las únicas prácticas realizadas son la limpia de malas hierbas una o dos veces al año en el piso inferior del bosque (Cruz 1992).

El cultivo de café rústico se localiza generalmente en áreas mal comunicadas, con una topografía accidentada de pendientes abruptas donde, otro tipo de cultivos no han podido establecerse permanentemente y ocupan un porcentaje mínimo de la superficie cafetalera de la región de Veracruz (Cruz 1992).

Esta práctica no es la mejor debido a su baja producción (Cruz 1992) sin embargo, dado que conlleva una mínima perturbación de las condiciones naturales, se asume que es una práctica que mantiene y/o conserva la calidad del suelo.

6.4.4.2 Vegetación secundaria (acahual).

Como se mencionó anteriormente, el *acahual* es un tipo de vegetación secundaria que conforma una transición hacia la selva tropical húmeda (Toledo 1972). Durante los primeros años de sucesión secundaria se observan en la comunidad vegetal un aumento en la diversidad de especies, el cual, conforme avanza la sucesión, tiende a hacerse constante (Rico 1972).

La *sucesión ecológica* es un proceso de cambios direccionales que experimenta un ecosistema en la composición de sus especies a través del tiempo. La sucesión es dividida en primaria y secundaria. La *sucesión primara* se origina en lugares con ausencia de vegetación y/o que no han sido colonizadas anteriormente. Por su parte, la *sucesión secundaria* se presenta en sitios previamente ocupados por algún tipo de cobertura

vegetal que, al ser sujeta a algún tipo de disturbio de origen natural o antropogénico favorece el surgimiento de especies pioneras que al paso del tiempo, reestablecerán la vegetación original o clímax (Odum 1972).

De acuerdo a Gómez-Pompa y Ludlow (1976), la *sucesión secundaria* es un proceso ecológico caracterizado por los cambios que se suceden en un ecosistema después de una perturbación natural o humana hasta llegar a un estado estable. Dicha sucesión, como proceso de regeneración, suele ser rápida en las zonas tropicales cálido-húmedas. Sin embargo, existen diversos factores que pueden afectar, retrasar o detener la sucesión. La pérdida del suelo, así como la disminución en su calidad, pueden alterar la actividad de la microbiota (hongos y bacterias), la cual, al estar en estrecha relación con el establecimiento y crecimiento de diferentes especies de plantas podría afectar el proceso sucesional.

Respecto a la diversidad de especies presentes en un acahual, Carabias (1980) reporta, para un acahual de 25 años derivado de selva alta perennifolia, un número de 107 especies en un área de 2 km² incluyéndose especies con alturas mayores a 30 cm y para un acahual de 5 años reporta un total de 92 especies en un área de 0.5 km². Las especies dominantes en cada uno de estos acahuales son mostradas en la **Tabla 6.4b**.

Carabias (1980) identifica grandes variaciones florísticas entre las selvas y los acahuales. Sin embargo, también reporta presencia de especies de selva alta perennifolia en acahuales. Se espera que en este tipo de vegetación secundaria, presente en los cafetales abandonados, se obtengan cuantificaciones en las propiedades del suelo cercanas a su condición original (selva alta perennifolia).

Tabla 6.4b – Especies dominantes en dos acahuals con diferentes edades, de acuerdo a Carabias (1980).

| Acahual de 25 años. | Acahual de 5 años. |
|--|---|
| <i>Myriocarpa longipes</i> , <i>Piper hispidum</i> <i>Heliconia sp.</i> <i>Cecropia obtusifolia</i> <i>Lonchocarpus guatemalensis</i> <i>Chamaedorea sp.</i> <i>Robinsonella mirandae</i> <i>Acalypha sp.</i> <i>Costus spicatus</i> <i>Jacobinia sp.</i> <i>Acalypha diversifolia</i> <i>Albizia purpusin</i> <i>Acalypha skutchii</i> <i>Piper nitidum.</i> | <i>Abizia purpusin</i> <i>Acalypha sp.</i> <i>Scleria pterota</i> <i>Piper hispidum</i> <i>Desmodium canun</i> <i>Eupatorium odoratum</i> <i>Panicum trichoides</i> <i>Lonchocarpus guatemalensis</i> <i>Hyptis atrorubens</i> <i>Solanum rugosum</i> <i>Verbesina alata</i> <i>Vernonia deppeana</i> <i>Lantana trifolia</i> <i>Hyperbaena sp.</i> <i>Solanum verbascifolium</i> <i>Neurolaena lobata</i> <i>Cecropia obtusifolia.</i> |

7 MÉTODO

7.1 Muestreo

Las muestras fueron tomadas de 32 sitios en el Ejido San Fernando, Veracruz a finales del mes de enero del 2004. Se identificaron 4 usos de suelo diferentes: (1) selva alta perennifolia, (2) maizales, (3) pastizales y (4) sistemas agroforestales de café y cafetales acahualados. En cada uno de ellos se eligieron 8 parcelas para tomar dos diferentes tipos de muestras:

- a) Una muestra compuesta conformada de 16 núcleos de suelo superficial (0-20cm) tomados con una barrena de 5 cm de diámetro y 20 cm de largo, profundidad a la que se llevan a cabo la mayor parte de las actividades microbióticas (Taylor *et al.* 2002). Estas 16 submuestras se tomaron siguiendo el diagrama de la **Figura 7.1a**, esto es, 8 núcleos alrededor del núcleo central con una distancia de 2 m y otros 8 núcleos a una distancia de 4m del punto central. En cada punto se hicieron dos barrenaciones que se fueron colectando en una cubeta de plástico para al final, mezclarla y tomar de ahí 500g de suelo en bolsas de plástico para las características físicas y químicas y otros 100g en bolsas pequeñas que fueron guardadas a 4°C para cuantificar en ellas la actividad enzimática (Ver **Figura 7.1c**).

1 muestra compuesta x 8 parcelas x 4 usos de suelo = 32 muestras.

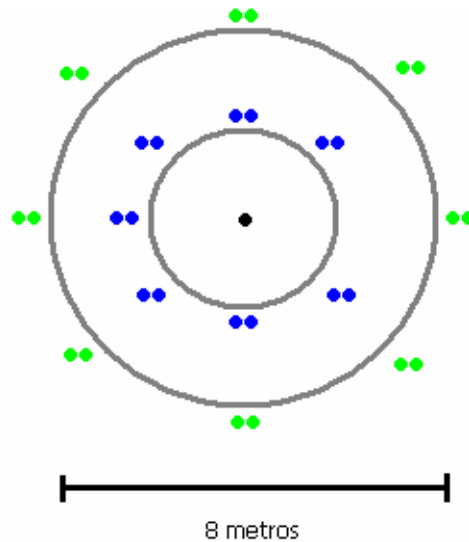


Figura 7.1a- Esquema del núcleo central. Se observa la toma de muestras para análisis fisicoquímicos y actividad enzimática en el Ejido San Fernando.

- b) 10 submuestras de suelos tomadas con cilindros de acero inoxidable de 100 mL en cada uno de los 32 sitios seleccionados, a lo largo de un transecto de 8 m cubriendo el diámetro del núcleo central (**Figura 7.1b**) insertando en el suelo 10 cilindros con una capacidad de 100 mL. Los cilindros fueron limpiados en ambas bases y guardados en bolsas (Ver **Figura 7.1c**).

10 cilindros x 8 parcelas x 4 usos de suelo = 320 muestras.

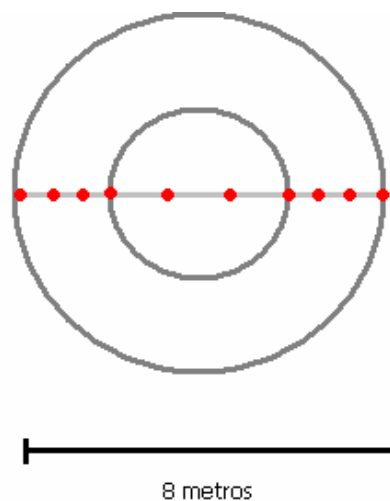


Figura 7.1b - Toma de 10 submuestras a lo largo del núcleo central en cada uno de los sitios para la determinación de la densidad aparente y real.

Estos sitios fueron clasificados en campo siguiendo las iniciales del ejido (SF), un número de clasificación (ver **Anexo 1**) y las iniciales del uso del suelo: selvas (S), maizales (M), pastizales (P) y, sistemas agroforestales de café y acahuales (A), agrupándolos de acuerdo al manejo e historia individual de cada uno de los sitios. El **Mapa 2** muestra la localización de los puntos de muestreo en el Ejido San Fernando.

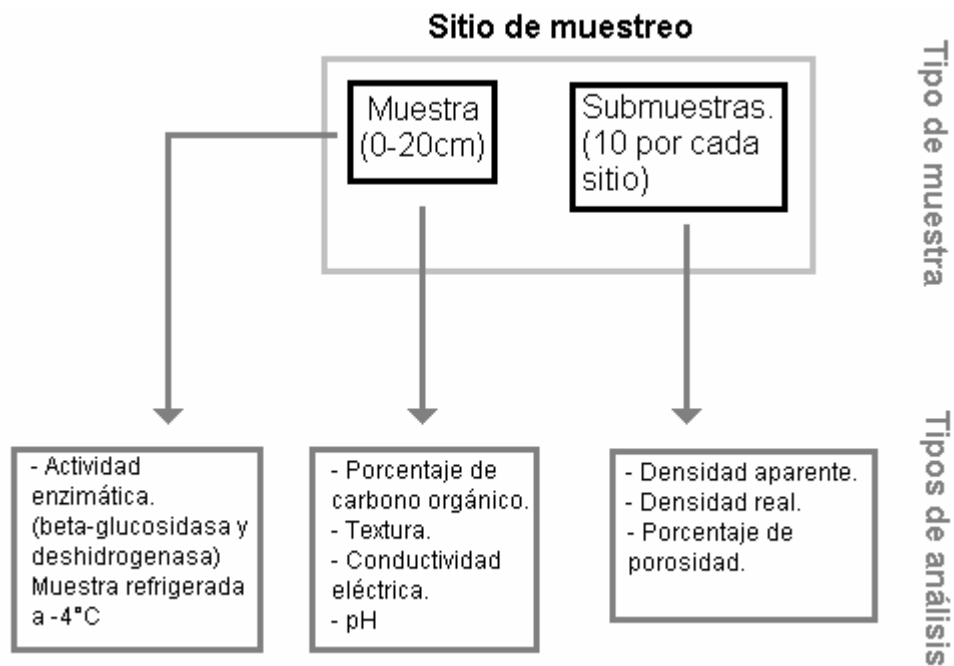


Figura 7.1c – Diagrama donde se representan los tipos de muestras y los análisis que se llevaron a cabo.

7.2 Análisis de laboratorio

La norma utilizada para realizar el pretratamiento de las muestras fue la ISO 11464: 1994 (E) – “Soil Quality – Pretreatment of samples of physico – chemical analyses”. Las 32 muestras se dejaron secar en charolas de plástico por 1 semana. Posteriormente, se tamizaron a través de una malla No. 10 equivalente a 2mm de diámetro, almacenándose en bolsas de plástico para los análisis físicos y químicos.

Las muestras para la actividad enzimática se refrigeraron a 4°C almacenándolas en la oscuridad por no más de dos meses. Previo a los análisis enzimáticos, parte de esta muestra se secó por un día, una vez seca se tamizó a través de una malla de 2mm para su análisis inmediato.

7.2.1 Análisis biológicos

7.2.1.1 β -glucosidasa (Tabatabai 1982; Eivazi y Tabatabai 1988, en Alef y Nannipieri 1995).

Procedimiento:

- Pesar en tubos de ensaye 1 gramo de muestra de suelo semihúmedo (con un día de secado al aire libre) tamizado en una malla de 2mm (No. 10).
- Añadir 0.25 mL de tolueno, 4 mL de solución MUB y 1 mL de solución PNG (p-nitrofenil glucopiranoside 50mM). Tapar los tubos de ensaye. Mezclar vigorosamente.
- Incubar por 1 hora en el horno precalentado a 37°C.
- Añadir 1 mL de solución CaCl_2 0.5 M, 4 mL de buffer Tris a pH 12. (THAM, para detener la reacción)
- Agitar los frascos e inmediatamente filtrar (filtros Whatman 2v).
- Cuantificar la absorbancia en el espectrofotómetro a una intensidad de color de 400 nm.
- Cada 23 muestras se incluyeron dos blancos.
- Cada muestra se realizó por triplicado.

Curva de calibración:

- Realizar la curva de calibración elaborando una solución patrón: disolver un gramo de PNP (p-nitrofenil) en 100 mL de agua destilada (**Tabla 7.2a**)
- Tomar 1 mL de la solución patrón y llevarlo a 100 mL de agua destilada en un matraz volumétrico.

Tabla 7.2a - Elaboración de la curva para la cuantificación de la enzima β -glucosidasa. Relación de mL de solución de p-nitrofenil-glucopiranoside y mL de H₂O.

| Punto de la curva | mL de la solución PNG | mL de H ₂ O destilada |
|-------------------|-----------------------|----------------------------------|
| 0 | 0 | 5 |
| 1 | 1 | 4 |
| 2 | 2 | 3 |
| 3 | 3 | 2 |
| 4 | 4 | 1 |
| 5 | 5 | 0 |

7.2.1.2 Deshidrogenasa (Friedel *et al.* 1994).

Procedimiento:

- Pesar 2.5 g de suelo tamizado (Tamiz No. 10, con abertura de malla de 2 mm) en tubos de ensaye (3 repeticiones por muestra, 2 blancos por cada 23 muestras).
- Agregar 2.5 mL de solución INT – Tris.
- Burbujear N₂ en los tubos.
- Tapar de inmediato los tubos con los tapones de manera que sellen bien.
- Homogeneizar en el agitador de tubos (15 seg.)
- Colocar los tubos en baño María durante 4 horas a 47°C.
- Anotar la hora. Homogeneizar dos veces durante la incubación.
- Agregar 10 mL de THF a cada tubo.
- Homogeneizar con el agitador de tubos (10")
- Colocar los tubos en el agitador mecánico a 270 rpm, protegidos de la luz, durante 2 horas.
- Filtrar a frascos de vidrio. Cuidar que todo el suelo pase a los filtros.
- Retirar los filtros y dejarlos secar debajo de la campana.

Determinación de la concentración total de cloruro de idonitrotetrazolio formazán (INTF)

- Diluir todas las muestras con acetona (1 mL de filtrado + 7 mL de acetona) en tubos de ensaye
- Leer en el espectrofotómetro UV a 487 nm contra un blanco de agua destilada.

Curva de calibración:

Tabla 7.2b - Elaboración de la curva para la cuantificación de la enzima deshidrogenasa. Relación de mL de solución de patrón, THF y Sol. Tris -INT.

| Sol patrón (mL) | THF (mL) | Sol. Tris-INT | [mg INTF/12.5 mL] |
|-----------------|----------|---------------|-------------------|
| 0 | 10 | 2.5 | 0.0 |
| 1 | 9 | 2.5 | 0.4 |
| 2 | 8 | 2.5 | 0.8 |
| 4 | 6 | 2.5 | 1.6 |
| 5 | 5 | 2.5 | 2.0 |
| 6 | 4 | 2.5 | 2.4 |

7.2.1.3 Carbono orgánico. ISO 14235: 1998

Procedimiento:

- Pulverizar la muestra en un molino mecánico durante cinco minutos.
- Pesar aproximadamente 20 mg de suelo dependiendo de la coloración del suelo y de la cantidad de materia orgánica esperada.
- Transferir la muestra a un matraz Erlenmayer.
- Adicionar 5 mL de solución de dicromato de potasio 0.27 mol/L y 10 mL de ácido sulfúrico.
- Enfriar el matraz y añadir 50 mL de H₂O bidestilada.
- Añadir 5 mL de ácido fosfórico.
- Transferir el contenido a matraces volumétricos de 100 mL, aforar con H₂O bidestilada. Sedimentar por 1 h.
- Centrifugar a 3000 rpm por 10 minutos.

- Leer espectrofotométricamente a 585 nm.
- Analizar un blanco y una muestra de referencia. Los análisis se realizan por duplicado.

Curva de calibración:

- Preparar una solución de glucosa (14.4 mg de C / mL) 3.60 g de glucosa en 100 mL, dilución 1:10.
- Preparar las alícuotas de la curva de calibración junto con las muestras (**Tabla 7.2c**).

Tabla 7.2c - Elaboración de la curva de calibración para la cuantificación del contenido de carbono orgánico. Relación de mL de solución de glucosa 1:10.

| Número de tubo | mL de la solución de glucosa 1:10 | Contenido de carbono mg C/100 mL |
|----------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 0.00 | 0.0 |
| 2 | 0.50 | 0.72 |
| 3 | 1.00 | 1.44 |
| 4 | 2.00 | 2.88 |
| 5 | 5.00 | 7.20 |
| 6 | 10.00 | 14.40 |
| 7 | 20.00 | 28.80 |

7.2.2 Análisis químicos.

7.2.2.1 pH ISO 10390:1994

Procedimiento:

- Colocar en un frasco de 100 mL un volumen de 10 mL de suelo
- Añadir 50 mL de cloruro de calcio (CaCl_2 0.01M) en una relación 1:5
- Agitar por 5 minutos en un agitador mecánico a 240 rpm
- Dejar sedimentar por 6 horas
- Cuantificar el pH en un potenciómetro Beckman, agitando levemente el frasco antes de la lectura.
- Ajustar el aparato con dos soluciones amortiguadoras (pH 4 y pH 7).
- Hacer un duplicado por cada muestra

7.2.2.2 Conductividad eléctrica ISO 11265:1994

Procedimiento:

- Colocar en un frasco de 100 mL un volumen 10 g de suelo
- Añadir 50 mL de agua bidestilada en una relación 1:5
- Agitar por 4 horas a 250 rpm
- Filtrar usando filtros Whatman No 542
- Ajustar el conductímetro con una solución $1185 \mu\text{S cm}^{-1}$
- Medir la conductividad eléctrica del filtrado en el conductímetro.
- Realizar un duplicado por cada una de las muestras.

7.2.3 Análisis físicos.

7.2.3.1 Textura ISO 11277: 1998

Procedimiento:

- Pesar 20g de muestra tamizada en vasos de precipitado de 250 mL.
- Destruir la materia orgánica adicionándole a cada frasco 30 mL de peróxido de hidrógeno al 30 %
- Colocar los frascos en un baño maría hasta que la reacción entre el peróxido y la materia orgánica deje de ser visible (deje de burbujear).
- Lavar las muestras añadiendo agua destilada
- Dejar sedimentar
- Cuantificar la conductividad eléctrica del sobrenadante; si es menor a 0.4 dS cm^{-1} extraer el sobrenadante, si no es así, nuevamente añadir agua destilada y dejar sedimentar.
- Añadir un agente dispersante elaborado al disolver 33 g de hexametáfosfato de sodio y 7 g de carbonato de sodio anhidro en 1 L de agua destilada.
- Colocar la solución en una probeta de 1 L.
- Agitar la solución y leer con el hidrómetro a los 40 s y a las 2 h.
- Medir la temperatura a los 40 s y a las 2 h.
- Realizar los cálculos correspondientes y clasificar la textura con el triángulo de texturas (**Figura 7.2a**)
- Hacer un control y una repetición por cada 10 muestras..

- Restar el volumen de las rocas, ramas y raíces (v_1) al volumen del vaso de 100 mL (v_v), para obtener el volumen total (v_T).
- Restar el peso del vaso de precipitado a peso constante (m_v) al peso del vaso con el suelo seco (m_{sv})
- Dividir el peso del suelo seco (m_{ss}) entre el volumen total (v_T) para obtener la densidad aparente (ρ_a) (**Fórmula 8**)
- No realizar repeticiones dado que cada 10 submuestras corresponden al suelo de un sitio determinado.

$$\rho_a = m_{ss} / v_T \quad \text{(Fórmula 8)}$$

7.2.3.3 Densidad real ISO 11508:1998

Procedimiento:

- Pesar 10 g de suelo de las muestras usadas para determinar la densidad aparente en un picnómetro de 50 mL (m_s).
- Añadir agua destilada hervida.
- Remover las burbujas de aire en el interior de los picnómetros.
- Llenar totalmente de agua el picnómetro.
- Pesar el picnómetro con suelo y agua destilada (m_{sa}).
- Limpiar el picnómetro, llenarlo con agua bidestilada y volverlo a pesar (m_a).
- Tomar la temperatura para calcular la densidad del agua (ρ_{H2O}).
- Pesar el picnómetro libre de agua y suelo.
- Realizar el cálculo con la siguiente fórmula para calcular la densidad del suelo (ρ_r).

$$\rho_r = ((\rho_{H2O} * m_s) / (m_s - m_{sa} - m_a)) \quad \text{(Fórmula 9)}$$

- Realizar una repetición por cada 10 muestras de suelo..

7.2.3.4 Porcentaje de porosidad

Procedimiento:

- Calcular el porcentaje de porosidad mediante la relación directa entre la densidad real (ρ_r) y la densidad aparente (ρ_a) de la siguiente forma:

$$\% \text{ porosidad} = (100 * (\rho_r - \rho_a) / \rho_r) \quad \text{(Fórmula 10)}$$

7.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

Los datos fueron analizados usando el software STATISTICA, Versión 6.0 (**Tablas 8a, 8b y 8c**). Se realizaron pruebas ANOVA de una vía con un nivel de significancia $P < 0.05$, $P < 0.01$ y $P < 0.001$ para determinar la existencia de diferencias al interior de los “tratamientos”, que en este caso corresponden a tipos de uso de suelo (**Tabla 8d**) y pruebas de Tukey (**Anexo 6**) para determinar qué tratamientos eran diferentes unos de otros. Se calcularon los coeficientes de correlación (r^2) (nivel de significancia de $p < 0.05$) entre todas las variables para todos los usos de suelo juntos.

8 RESULTADOS

Se muestran los resultados promedio de todas las propiedades, divididas en biológicas (**Tabla 8a**), físicas (**Tabla 8b**) y químicas (**Tabla 8c**). Se representan promedios, desviación estándar o DPR según sea el caso para cada uno de los sitios. Los datos completos se presentan en el **Anexo 2** para las propiedades biológicas, en el **Anexo 3** para las propiedades físicas, y en el **Anexo 4** para las propiedades químicas. Se obtuvo una producción de p-nitrofenol (PNP) entre 1490 mg PNP kg⁻¹ h⁻¹ y 4904 mg PNP kg⁻¹ h⁻¹, producción de idonitroterazolium formazán violeta (INT-F) entre 81.6 mg INTF kg⁻¹ h⁻¹ y 123.7 mg INTF kg⁻¹ h⁻¹, y porcentaje de carbono orgánico entre 3.65 % y 6.06 %. El pH de los suelos varía entre 4.80 y 5.34 representando un pH ácido. La conductividad eléctrica va de 48.03 μS cm⁻¹ a 101.09 μS cm⁻¹, con texturas que van de 45.07 % a 55.92 %, de arcillas, 22.37 % a 28.29 % de arena y 18.42 % a 32.57 % de limo; la densidad aparente va de 0.47 g cm⁻³ a 0.82 g cm⁻³, la densidad real de 2.29 g cm⁻³ a 2.48 g cm⁻³ y el porcentaje de porosidad varía entre 69.24 % y 79.96 %.

En las diferentes gráficas se muestran los valores promedios de los 8 sitios en los 4 diferentes usos de suelo (selva alta perennifolia, maizal, pastizal y sistema agroforestal-cafetal). El valor promedio es representado por una línea; el valor promedio sumando y restando el error estándar equivale al tamaño de la caja de la gráfica, máximos y mínimos son representados como barras de error y los “puntos” representan valores extremos que no fueron contabilizados para el cálculo de las gráficas. Se presentan gráficas por separado para propiedades biológicas (**8.1**), propiedades químicas (**8.2**), y propiedades físicas (**8.3**). Las correlaciones entre las 11 propiedades del suelo, considerando todos los tipos de uso, son mostradas en las **Tabla 8.4a** y **8.4b**.

Tabla 8a- Valores promedio y desviación estándar de los indicadores biológicos para los cuatro usos de suelo. DE=desviación estándar, n=8

| Usos de Suelo | β -glucosidasa (mg PNP kg ⁻¹ h ⁻¹) | DE | Deshidrogenasa (mg INTF kg ⁻¹ h ⁻¹) | DE | (% de Carbono Orgánico) | DE |
|---------------|--|------|---|----|-------------------------|-----|
| Selva | 3664 | 3354 | 112 | 24 | 6.1 | 1.6 |
| Maizal | 2239 | 1617 | 82 | 25 | 3.6 | 0.6 |
| Pastizal | 4905 | 1934 | 117 | 29 | 5.8 | 1.5 |
| S.Agr. y C. | 4188 | 2536 | 124 | 41 | 5.2 | 0.9 |

Tabla 8b- Valores promedio y desviación estándar de los indicadores físicos y para los cuatro usos de suelo. DE=desviación estándar, n=8

| Usos de suelo | % arcillas | DE | % arena | DE | % limo | DE | Densidad Aparente (g cm ⁻³) | DE | Densidad Real (g cm ⁻³) | DE | % Porosidad | DE |
|---------------|------------|------|---------|------|--------|------|---|------|-------------------------------------|-----|-------------|-----|
| Selva | 46.4 | 22.8 | 28.3 | 12.2 | 25.3 | 13.2 | 0.47 | 0.06 | 2.29 | 0.2 | 80.0 | 2.3 |
| Maizal | 45.1 | 19.8 | 22.4 | 5.4 | 32.6 | 17.9 | 0.82 | 0.11 | 2.47 | 0.3 | 70.2 | 9.7 |
| Pastizal | 55.9 | 12.9 | 25.6 | 9.9 | 18.4 | 6.3 | 0.74 | 0.08 | 2.40 | 0.2 | 69.2 | 2.1 |
| S.Agr y C. | 47.2 | 20.8 | 29.6 | 14.9 | 23.3 | 8.5 | 0.72 | 0.13 | 2.48 | 0.1 | 71.7 | 4.6 |

Tabla 8c- Valores promedio y desviación estándar de los indicadores químicos para los cuatro usos de suelo. n=8

| Usos de Suelo | pH | DPR | CE $\mu\text{S cm}^{-1}$ | DPR |
|---------------|-----|-----|-----------------------------|------|
| Selva | 5.0 | 0.5 | 101.1 | 23.2 |
| Maizal | 5.3 | 0.3 | 48.0 | 14.4 |
| Pastizal | 4.8 | 0.3 | 61.6 | 15.7 |
| S.Agr y C. | 5.2 | 0.5 | 87.1 | 23.5 |

Tabla 8d - Pruebas ANOVA para cada una de las propiedades en los cuatro usos de suelo muestreados. (*)Sitios con diferencias en sus propiedades comparando los diferentes usos del suelo.

| Propiedad del suelo | F(3,28) | Nivel de probabilidad |
|------------------------------------|---------|-----------------------|
| ✓ Porcentaje de carbono orgánico.* | 6.22 | 0.002 |
| ✓ β -glucosidasa | 1.72 | 0.186 |
| ✓ Deshidrogenasa | 2.81 | 0.058 |
| ✓ pH | 2.45 | 0.084 |
| ✓ Conductividad eléctrica.* | 11.96 | 0.000 |
| ✓ Porcentaje de arcilla | 0.52 | 0.673 |
| ✓ Porcentaje de arena | 0.65 | 0.589 |
| ✓ Porcentaje de limo | 1.82 | 0.166 |
| ✓ Densidad aparente* | 19.54 | 0.000 |
| ✓ Densidad real | 1.90 | 0.153 |
| ✓ Porcentaje de porosidad* | 6.15 | 0.002 |

8.1 Indicadores biológicos de degradación.

8.1.1 β -glucosidasa.

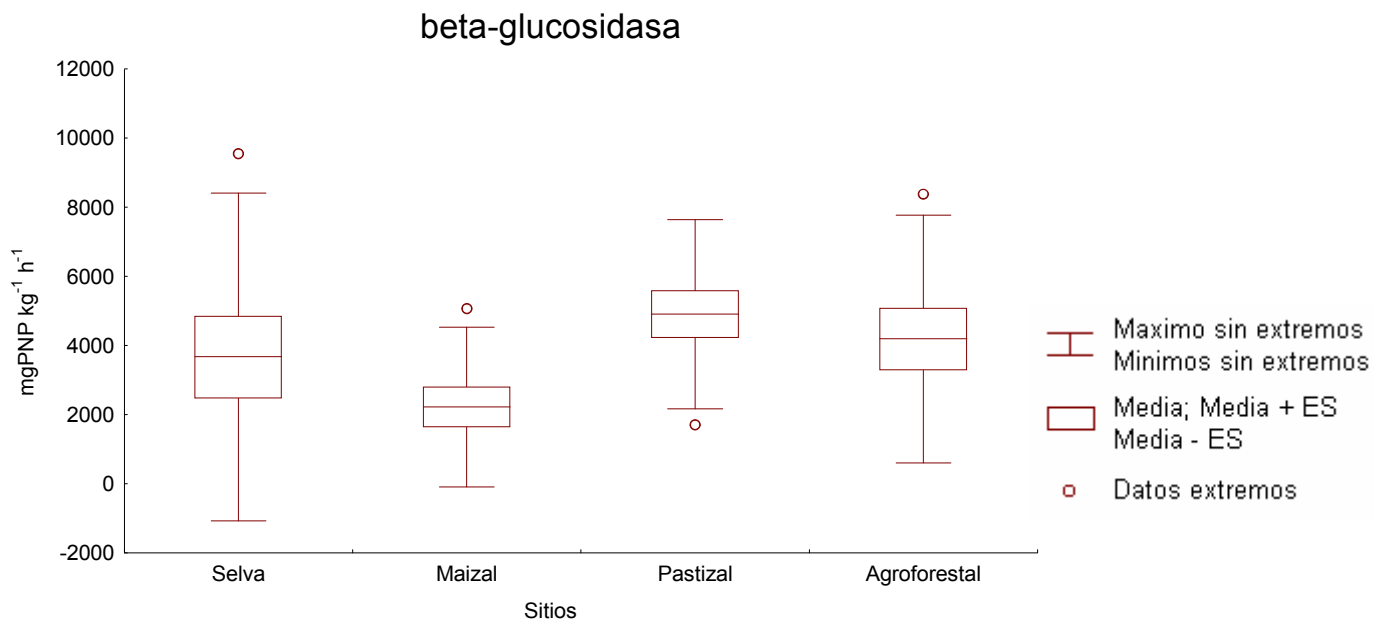
En la actividad de la β -glucosidasa (**Gráfica 8.1a**), cuantificada mediante la liberación de PNP, se reconocen los valores más bajos en las muestras de suelo tomadas en los maizales (2218 mg PNP kg⁻¹ h⁻¹, D.E.= 1632), seguidos de las selvas (3663 mg PNP kg⁻¹ h⁻¹, D.E.=3354), sistemas agroforestales (4187 mg PNP kg⁻¹ h⁻¹, D.E.=2536) y pastizales (4905 mg PNP kg⁻¹ h⁻¹, D.E.=1934). No se encontraron diferencias significativas $F(3,28)=1.71$, $p>0.05$ debido a la alta variabilidad al interior de cada uso de suelo. Se atribuye esta alta variabilidad al tipo de suelo.

8.1.2 Deshidrogenasa.

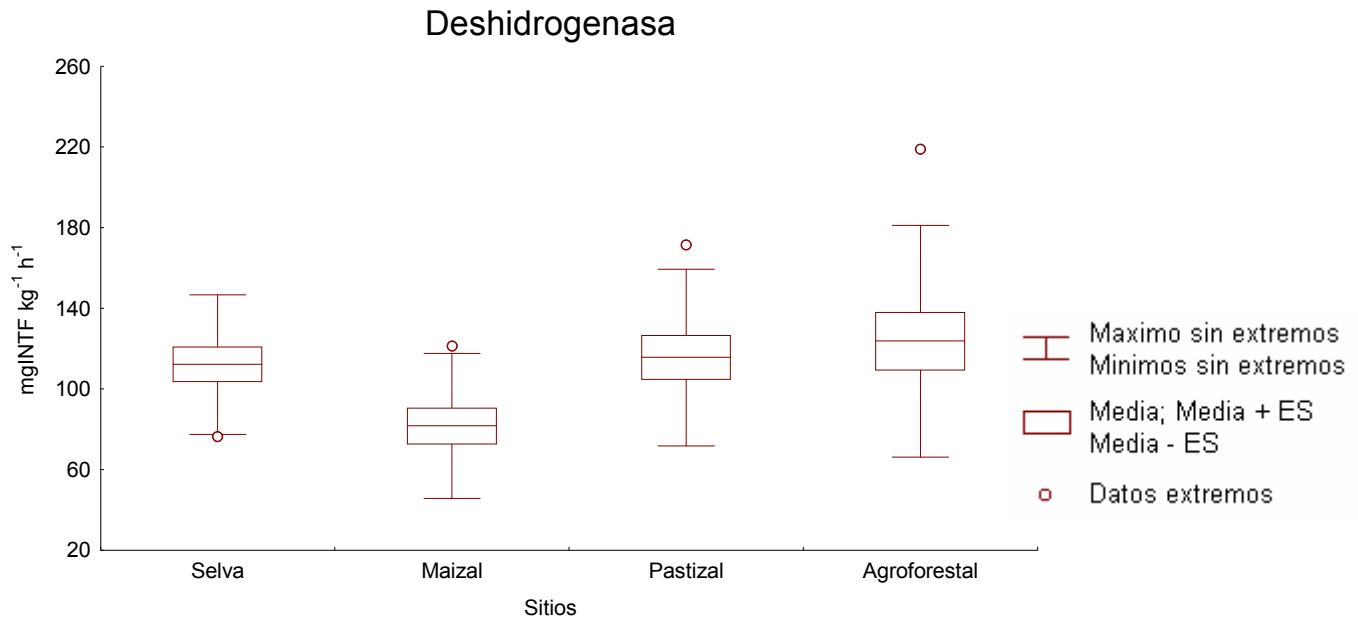
Los valores de las deshidrogenasas (**Gráfica 8.1b**) no mostraron diferencias entre ellas $F(3,28)=2.81$ $p>0.05$. La actividad de la deshidrogenasa cuantificada mediante la liberación de INTF, muestra un comportamiento parecido, encontrándose los valores más bajos en los maizales (81.6 mg INTF kg⁻¹ h⁻¹, D.E. =25.42) seguidos por las selvas (112.1 mg INTF kg⁻¹ h⁻¹, D.E. =24.47), los pastizales (117.1 mg INTF kg⁻¹ h⁻¹, D.E. =29.28) y por los sistemas agroforestales (123.7 mg INTF kg⁻¹ h⁻¹, D.E. =40.65). La variación al interior de cada uso de suelo fue menor que en el caso de la actividad de la β -glucosidasa debido al tipo de enzima (endocelular) y al tipo de suelo.

8.1.3 Porcentaje de carbono orgánico.

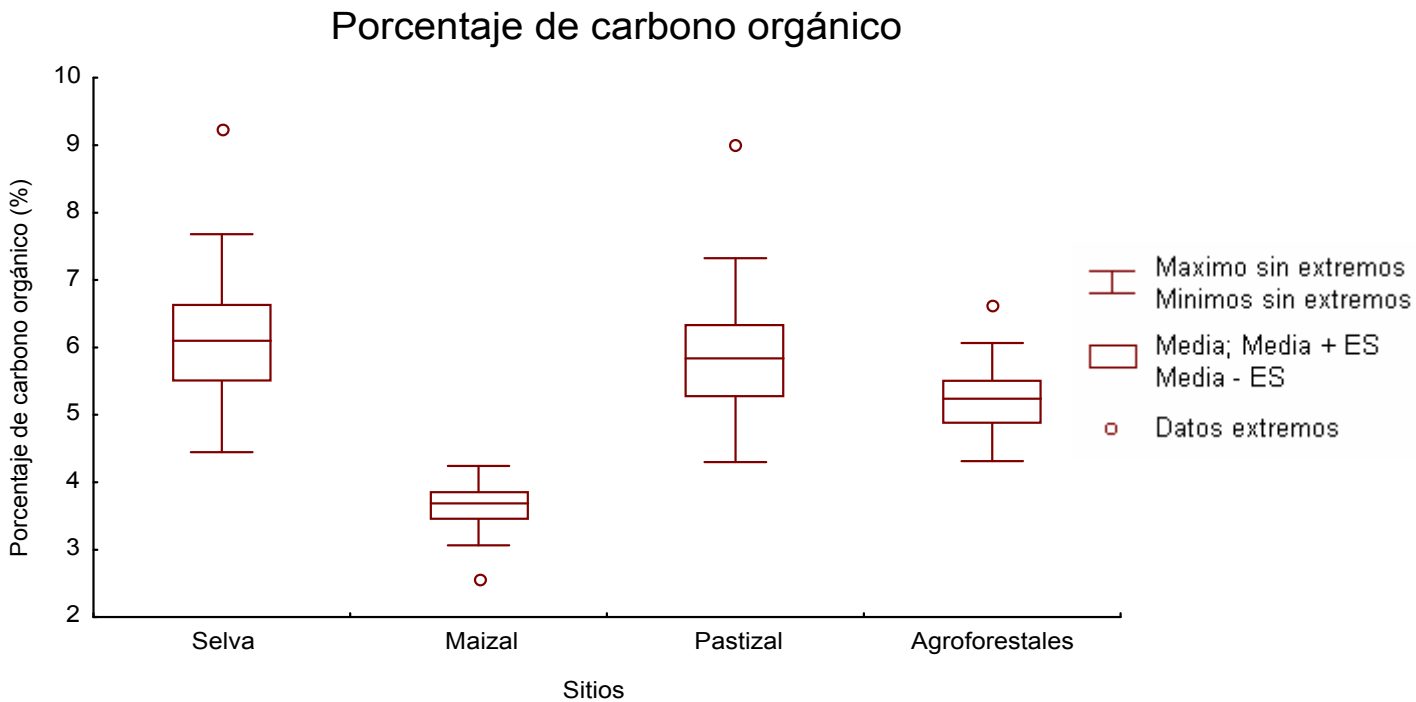
El porcentaje de carbono orgánico (**Gráfica 8.1c**) presente en el suelo, no mostró diferencias entre las selvas (6.1 %, D.E. =1.6), los pastizales (5.8 %, D.E.=1.5), y los sistemas agroforestales (5.2 %, D.E.=0.9), pero sí existieron diferencias $F(3,28)=6.0$, $p<0.01$ entre las selvas y los pastizales respecto a los maizales (3.7 %, D.E.=0.6).



Gráfica 8.1a-Actividad de la β -glucosidasa ($\text{mg PNP kg}^{-1} \text{h}^{-1}$) en los cuatro usos de suelo (selva, maizal, pastizal y sistemas agroforestales y cafetales) encontrados en el Ejido San Fernando, Veracruz.



Gráfica 8.1b- Actividad de la deshidrogenasa (mg INTF kg⁻¹ h⁻¹) en los cuatro usos de suelo (selva, maizal, pastizal y sistemas agroforestales y acahuales) encontrados en el Ejido San Fernando, Veracruz.



Gráfica 8.1c- Porcentaje de carbono orgánico del suelo en los cuatro usos de suelo (selva, maizal, pastizal y sistemas agroforestales y acahuales) encontrados en el Ejido San Fernando, Veracruz.

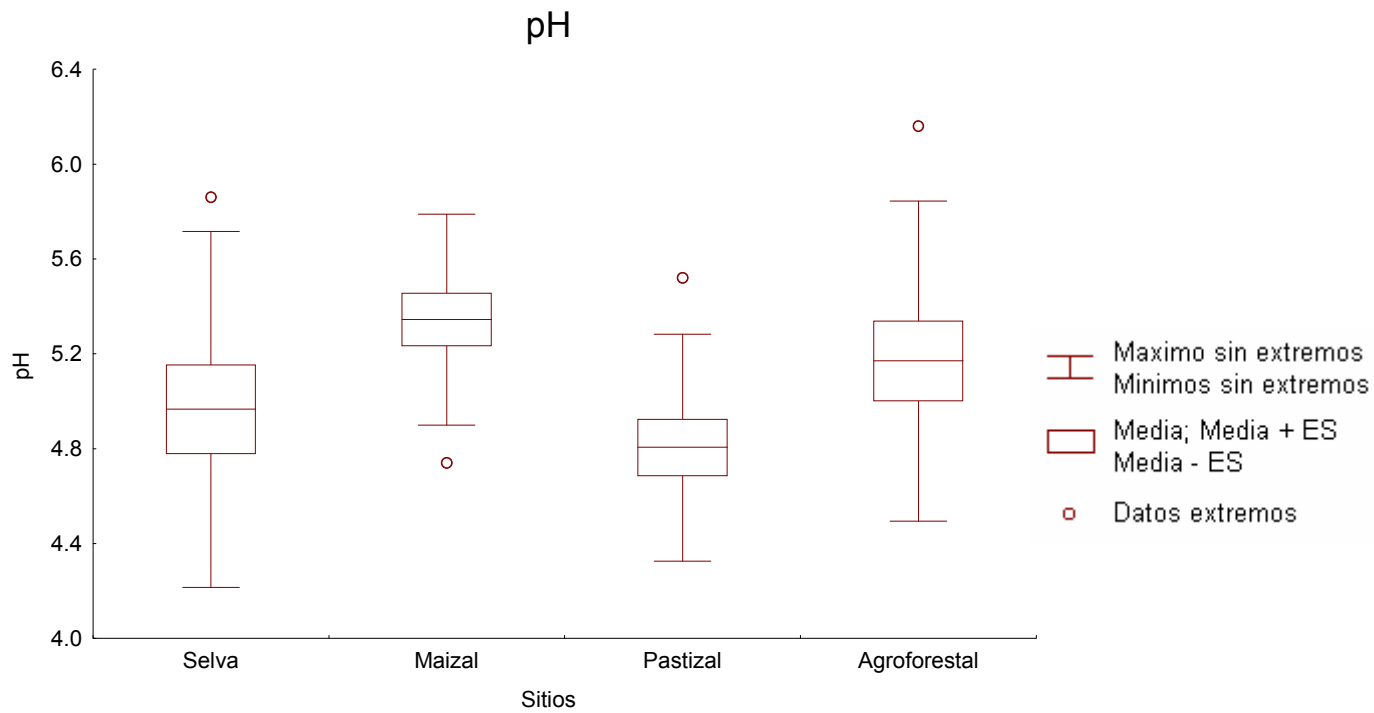
8.2 Propiedades químicas.

8.2.1 pH.

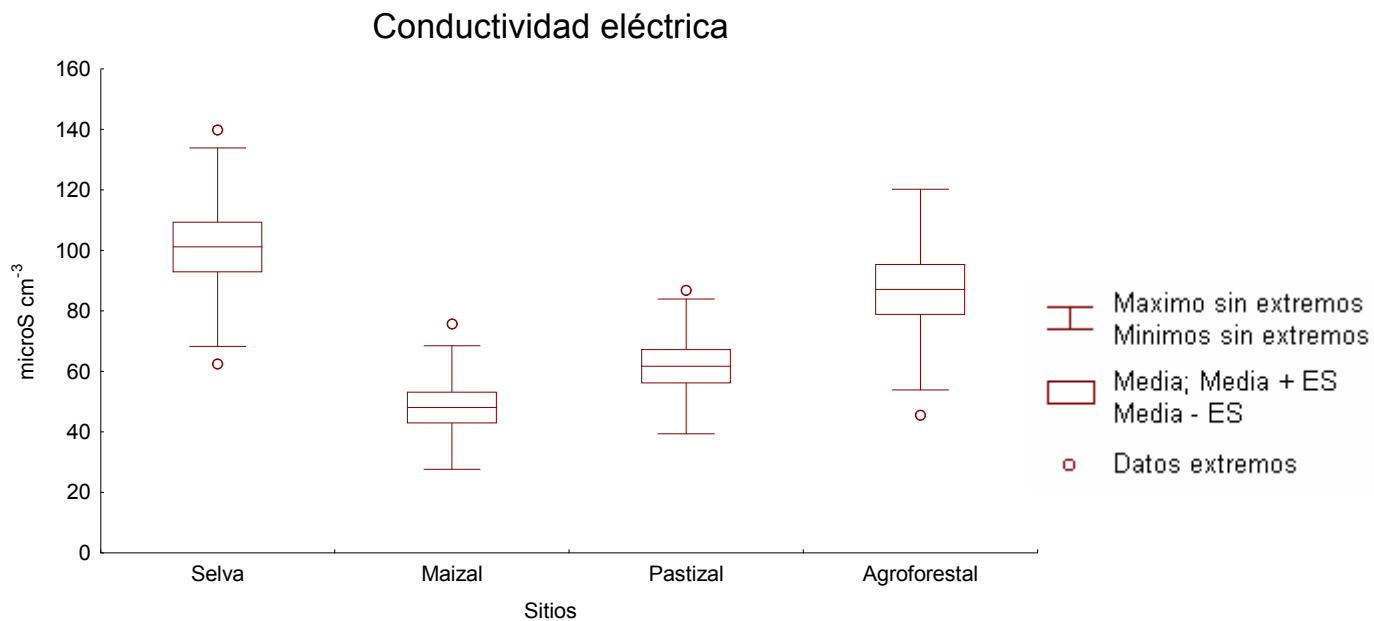
Los valores de pH (**Gráfica 8.2a**) varían desde 4.8, hasta 5.3 y no mostraron diferencias significativas $F(3,28)=2.45$, $p<0.0840$. Los valores promedio más bajos corresponden a los pastizales (4.80, D.E. = 0.34), seguidos por las selvas (4.97, D.E. =0.53), los sistemas agroforestales, (5.17, D.E. = 0.48) y los maizales (5.34, D.E. = 0.31).

8.2.2 Conductividad eléctrica.

Se encontraron diferencias significativas entre grupos para la conductividad eléctrica (**Gráfica 8.2b**) $F(3,28)=19.54$, $p<0.001$ siendo más alta la conductividad eléctrica en las selvas ($101.1 \mu\text{S cm}^{-3}$, D.E.=23.18) que en los maizales ($48.0 \mu\text{S cm}^{-3}$, D.E.= 14.44) y los pastizales ($61.64 \mu\text{S cm}^{-3}$, D.E.=15.74) pero estadísticamente igual a la encontrada en los sistemas agroforestales ($87.1 \mu\text{S cm}^{-3}$, D.E.= 23.47). También existieron diferencias entre el maizal y los sistemas agroforestales siendo menor en los maizales.



Gráfica 8.2a- Valores de pH medidos en las muestras de los cuatro usos de suelo (selva, maizal, pastizal y sistemas agroforestales y acahuales) encontrados en el Ejido San Fernando, Veracruz.



Gráfica 8.2b – Valores de la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-3}$) medidos en las muestras de los cuatro usos de suelo (selva, maizal, pastizal y sistemas agroforestales) encontrados en el Ejido San Fernando, Veracruz.

8.3 Propiedades físicas.

8.3.1 Porcentaje de arcillas.

La textura del suelo es mostrada como el porcentaje de arcillas (**Gráfica 8.3a**), arenas (**Gráfica 8.3b**) y limos (**Gráfica 8.3c**), existente en el suelo. El contenido de arcillas no mostró diferencias entre los sitios $F(3,28)=0.52$, $p>0.05$ Existió una alta variabilidad en los grupos. El valor más bajo corresponde a los maizales (45.1 %, D.E.= 19.8), seguido por las selvas (45.4 %, D.E. =22.8), los sistemas agroforestales (47.2 %, D.E. =20.8) y el valor más alto corresponde a los pastizales (55.9 %, D.E. = 12.9).

8.3.2 Porcentaje de arenas.

El contenido de arenas (**Gráfica 8.3b**) no mostró diferencias entre los sitios $F(3,28)=0.65$, $p>0.05$. Existió una alta variabilidad en los grupos. El valor más bajo corresponde a los maizales (22.4 %, D.E.= 5.4), seguido por los pastizales (25.6 %, D.E. =9.9), las selvas (28.3 %, D.E. =12.2), el valor más alto corresponde a los sistemas agroforestales (29.6 %, D.E. = 14.9).

8.3.3 Porcentaje de limos.

El contenido de limos (**Gráfica 8.3c**) no mostró diferencias entre los sitios $F(3,28)=1.82$, $p>0.05$. Existió una alta variabilidad en los grupos. El valor más bajo corresponde a los pastizales (18.4 %, D.E.= 6.3), seguido por los sistemas agroforestales (23.3 %, D.E.=8.5), las selvas (25.3 %, D.E. =13.4), el valor más alto corresponde a los maizales (32.6 %, D.E. = 17.9).

8.3.4 Densidad aparente.

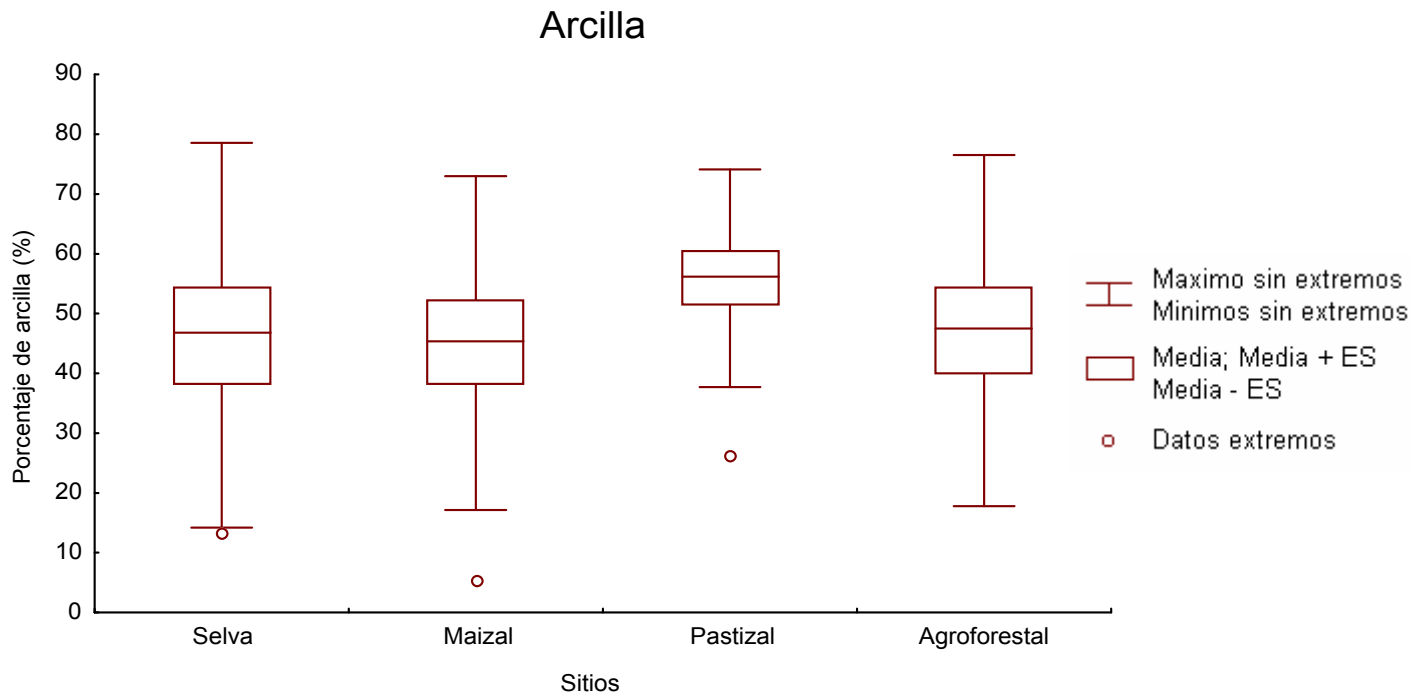
Existieron diferencias en la densidad aparente (**Gráfica 8.3d**) ($F=19.54$, $p<0.001$). Las selvas (0.47 g cm^{-3} , D.E.=0.06) tienen densidades aparentes menores respecto a los otros sitios. Entre los maizales (0.82 g cm^{-3} , D.E.=0.11), los pastizales (0.74 g cm^{-3} , D.E.=0.08), los sistemas agroforestales (0.72 g cm^{-3} , D.E.=0.11), no existieron diferencias.

8.3.5 Densidad real.

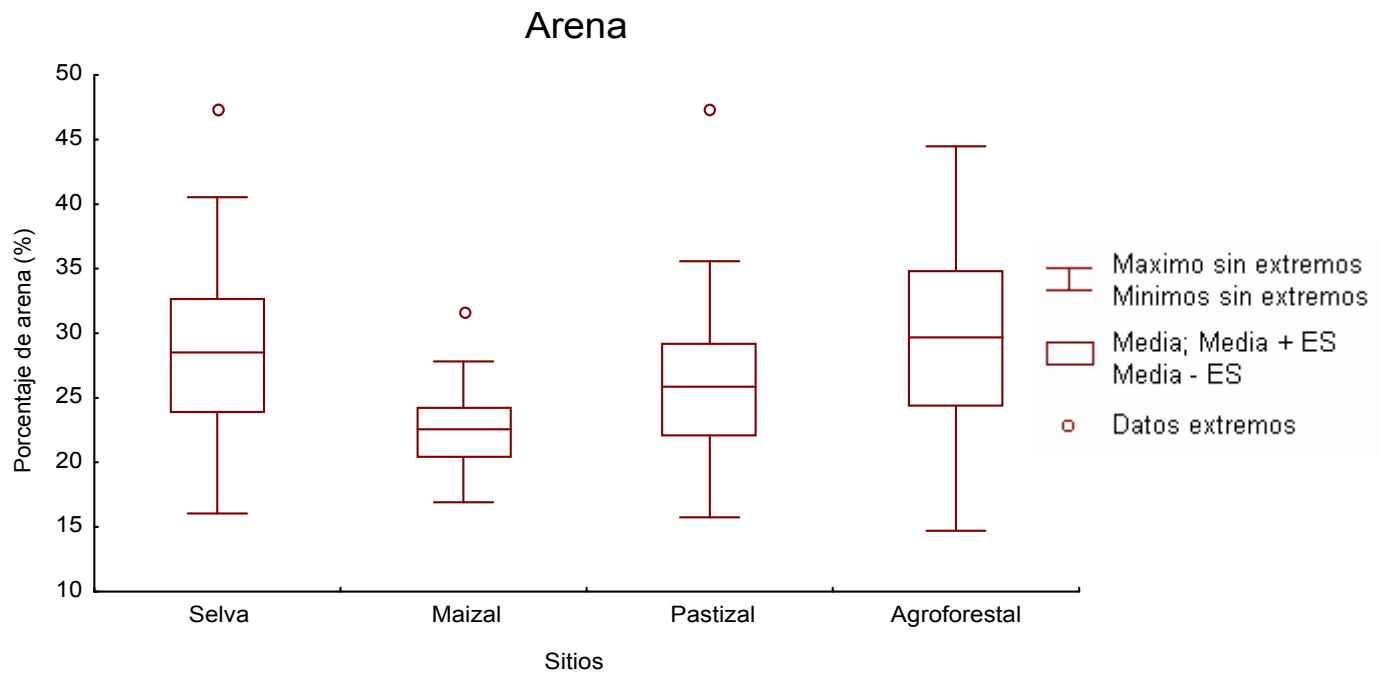
La densidad real (**Gráfica 8.3e**) no mostró diferencias ($F=1.89$, $p>0.05$). Las selvas mostraron los valores más bajos (2.29 g cm^{-3} , D.E.=0.15), seguidos por los pastizales (2.40 g cm^{-3} , D.E.=0.11), los maizales (2.47 g cm^{-3} , D.E.=0.11) y el valor más alto corresponde a los sistemas agroforestales (2.48 g cm^{-3} , D.E.=0.11).

8.3.6 Porcentaje de porosidad.

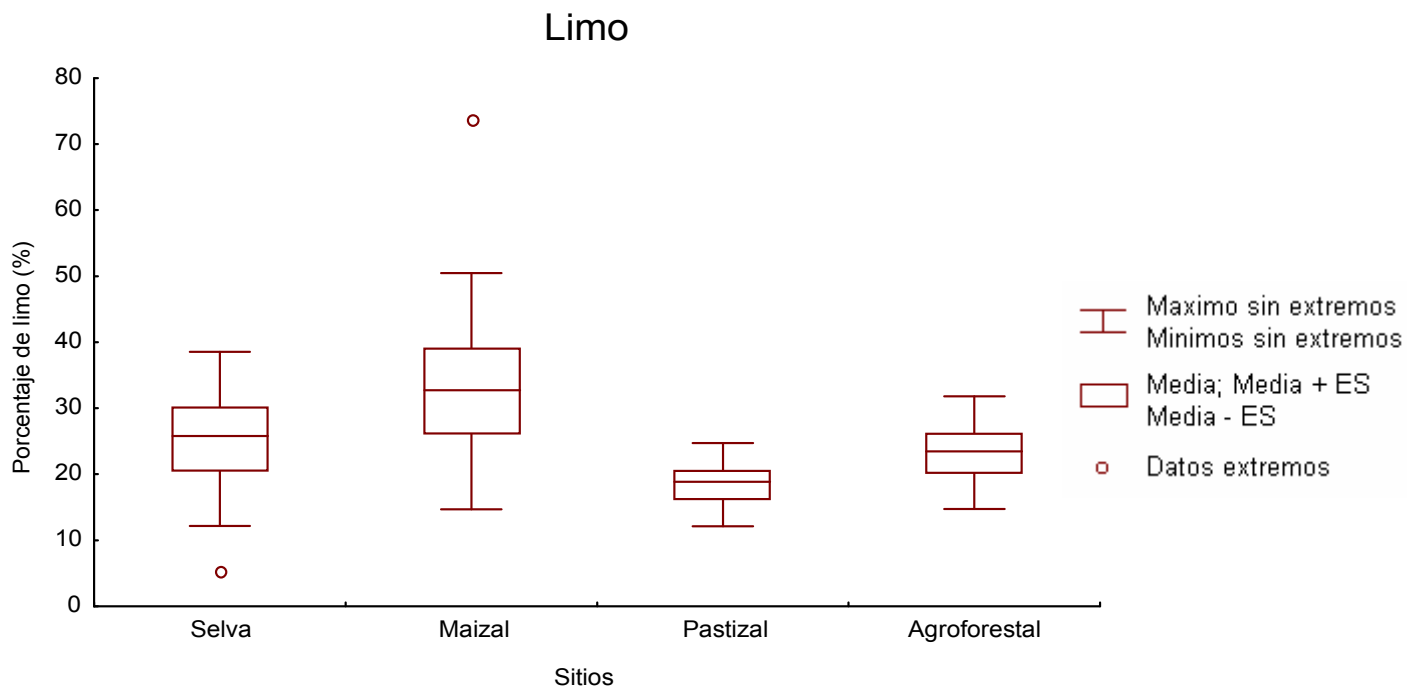
El porcentaje de porosidad (**Gráfica 8.3f**) mostró diferencias entre los grupos ($F=6.14$, $p<0.01$). Las selvas (79.96 %, D.E.=2.28) tuvieron un mayor porcentaje de porosidad respecto a los demás sitios. Los pastizales (69.24 %, D.E.=2.07) que tuvieron el valor más bajo, los maizales (70.15 %, D.E.=9.74) y los sistemas agroforestales (71.67 %, D.E. = 4.60) no mostraron diferencias entre sí.



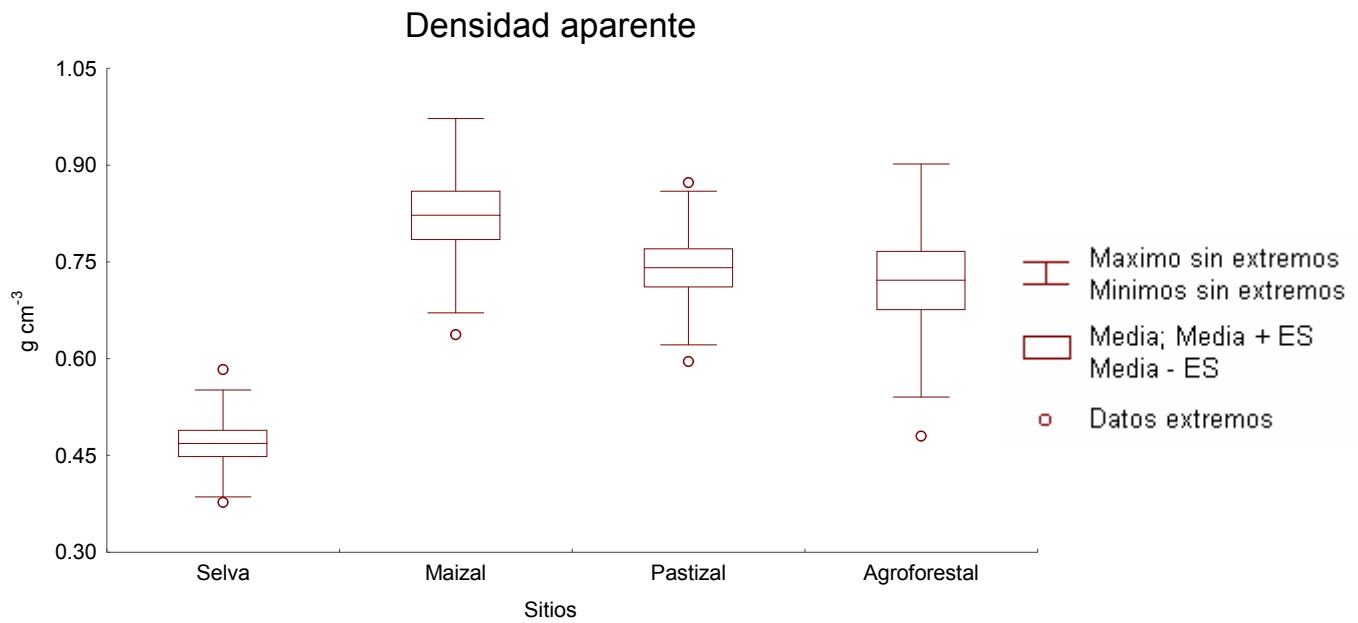
Gráfica 8.3a – Porcentaje de arcillas medido en las muestras de los cuatro usos de suelo (selva, maizal, pastizal y sistemas agroforestales y acahuales) encontrados en el Ejido San Fernando, Veracruz.



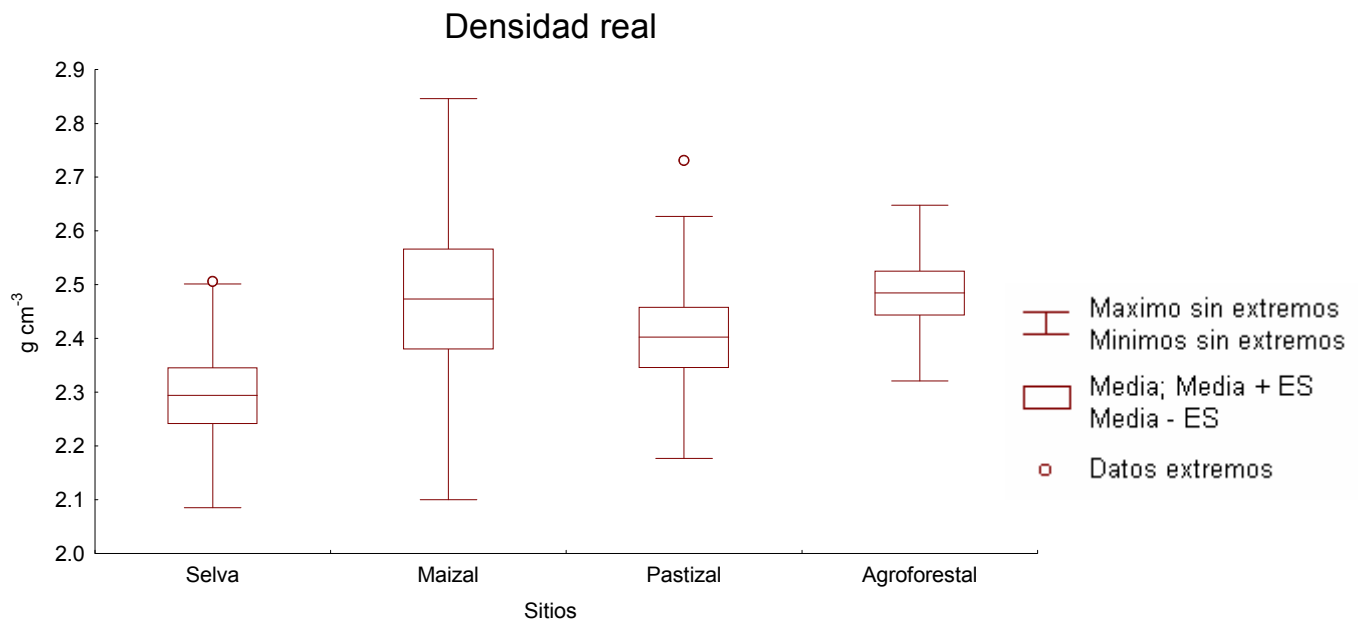
Gráfica 8.3b – Porcentaje de arena medido en las muestras de los cuatro usos de suelo (selva, maizal, pastizal y sistemas agroforestales y acahuales) encontrados en el Ejido de San Fernando, Veracruz.



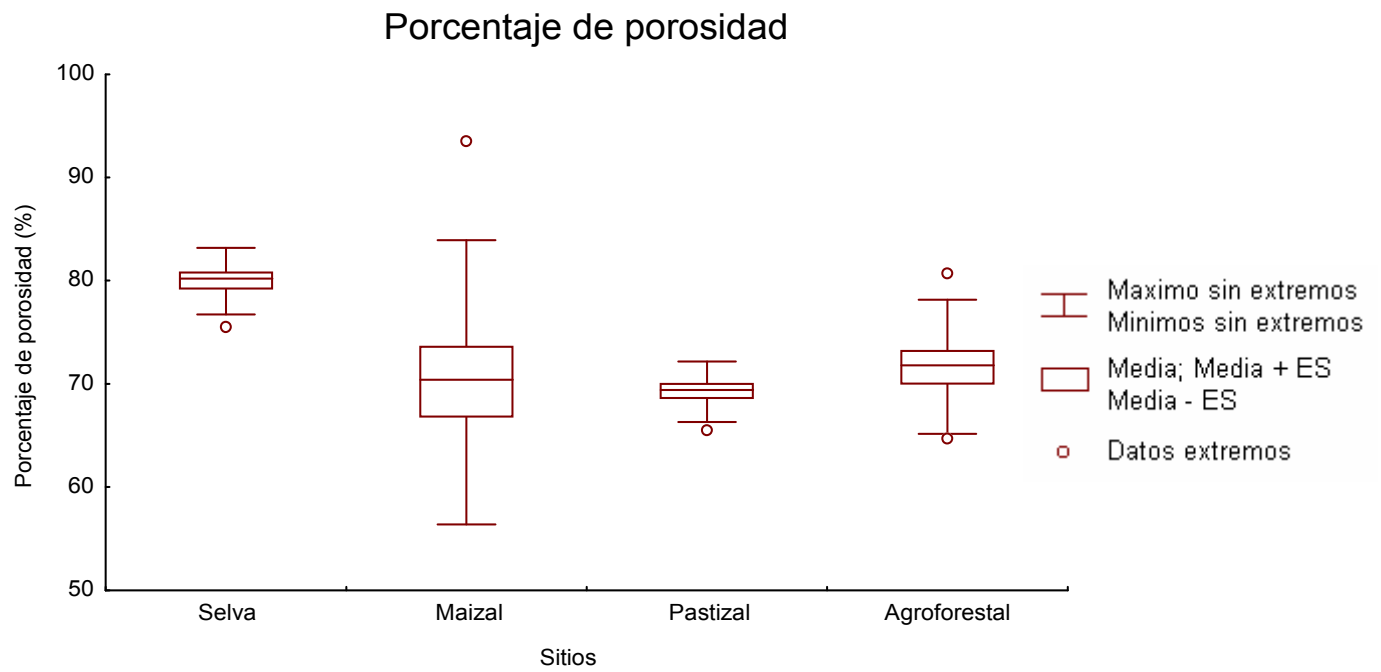
Gráfica 8.3c – Porcentaje de limo medido en las muestras de los cuatro usos de suelo (selva, maizal, pastizal y sistemas agroforestales y acahuales) encontrados en el Ejido de San Fernando, Veracruz.



Gráfica 8.3d – Valores de densidad aparente (g cm^{-3}) medidos en los cuatro usos de suelo (selva, maizal, pastizal y sistemas agroforestales y acahuales) encontrados en el Ejido San Fernando, Veracruz.



Gráfica 8.3e – Valores de densidad real (g cm^{-3}) medidos en los cuatro usos de suelo (selva, maizal, pastizal y sistemas agroforestales y acahuales) encontrados en el Ejido San Fernando, Veracruz.



Gráfica 8.3f – Porcentaje de porosidad medido en las muestras de los cuatro usos de suelo (selva, maizal, pastizal y sistemas agroforestales y acahuales) encontrados en el Ejido San Fernando, Veracruz.

8.4 Correlaciones

En la **Tabla 8.4a** se hace una síntesis de las correlaciones esperadas para cada indicador de degradación (los autores que las proponen son mostrados en la **Tabla 2.4c**). En la **Tabla 8.4b** se muestran las correlaciones encontradas en el presente estudio para poder comparar y verificar la validez de los experimentos. Se encontraron la mayoría de las correlaciones esperadas.

Tabla 8.4a -.Correlaciones esperadas (Ver autores en **Tabla 2.4c**). (CE) conductividad eléctrica; (DA) densidad aparente; (BG) β -glucosidasa; (%CO) porcentaje de carbono orgánico; (DH) deshidrogenasa; (DR) densidad real; (+) correlación significativa; (-) correlación no significativa; (/) correlación no definida entre diferentes estudios.

| Propiedades | pH | DA | CE | BG | % arcilla | %CO | % arena | % limo | DH | DR | % porosidad |
|-----------------------|------|------|------|------|-----------|------|---------|--------|------|------|-------------|
| Ph | 1.00 | | | | | | | | | | |
| DA | - | 1.00 | | | | | | | | | |
| CE. | / | - | 1.00 | | | | | | | | |
| β -Glucosidasa. | / | - | - | 1.00 | | | | | | | |
| % de arcillas | + | - | - | - | 1.00 | | | | | | |
| % carbono orgánico. | + | + | + | + | - | 1.00 | | | | | |
| % de arena. | + | - | - | - | + | - | 1.00 | | | | |
| % de limo. | + | - | - | - | + | - | + | 1.00 | | | |
| Deshidrogenasa. | / | - | + | + | - | + | - | - | 1.00 | | |
| Densidad real. | - | + | - | - | - | - | - | - | - | 1.00 | |
| % porosidad. | - | + | - | - | - | + | - | - | - | + | 1.00 |

Tabla 8.4b - Correlaciones de las 11 variables analizadas en los sitios (n=32) comparando los cuatro usos de suelo en el Ejido San Fernando $p < 0.05$. Son resaltados los índices de correlación que resultaron significativos. Abreviaciones en **Tabla 8.4a**.

| Propiedades | pH | DA | CE | BG | % arcillas | % CO | % arenas | % limo | DH | DR | % porosidad |
|-----------------------|--------------|--------------|-------------|-------------|--------------|--------------|-------------|--------|-------|--------------|-------------|
| Ph | 1.00 | | | | | | | | | | |
| DA | 0.08 | 1.00 | | | | | | | | | |
| CE | -0.02 | -0.58 | 1.00 | | | | | | | | |
| β -Glucosidasa. | -0.05 | -0.24 | 0.16 | 1.00 | | | | | | | |
| % de arcillas | -0.70 | 0.04 | -0.21 | 0.09 | 1.00 | | | | | | |
| % carbono orgánico. | -0.39 | -0.64 | 0.29 | 0.60 | 0.30 | 1.00 | | | | | |
| % de arena. | 0.52 | -0.23 | 0.41 | 0.26 | -0.76 | 0.04 | 1.00 | | | | |
| % de limo. | 0.59 | 0.14 | -0.04 | -0.35 | -0.83 | -0.47 | 0.26 | 1.00 | | | |
| Deshidrogenasa. | 0.35 | -0.29 | 0.44 | 0.33 | -0.45 | 0.21 | 0.65 | 0.11 | 1.00 | | |
| Densidad real. | 0.04 | 0.66 | -0.14 | -0.19 | -0.05 | -0.50 | -0.14 | 0.19 | -0.18 | 1.00 | |
| % porosidad. | 0.07 | -0.77 | 0.40 | 0.01 | -0.06 | 0.32 | 0.12 | -0.02 | 0.12 | -0.47 | 1.00 |

9 DISCUSIÓN

9.1 Indicadores biológicos.

Se obtuvieron valores altos en el contenido de carbono orgánico en los suelos muestreados (3.7 % - 6.1 %), valores reportados también por Aguilera (1988) para suelos bajo vegetación de selva alta perennifolia y subperennifolia en su transformación a suelos bajo cultivo de café y maizales, Cruz (1992) para suelos bajo vegetación de cafetal y Sommer-Cervantes *et al.* (2003) para selva alta perennifolia.

Los resultados muestran que de los indicadores biológicos, sólo el porcentaje de carbono orgánico responde como indicador de degradación del suelo, siendo estadísticamente bajo en los sitios de maizales respecto a las selvas y pastizales, pero no estadísticamente diferente a los sistemas agroforestales-cafetales; sin embargo se observa una disminución en el contenido de carbono orgánico en los maizales respecto a estos sistemas.

La disminución en el carbono orgánico del suelo en los sitios de maizales es explicable por las prácticas de cultivo: el arado fomenta el rompimiento de agregados, aumenta la disponibilidad de sustratos orgánicos para los microorganismos, facilitando así la descomposición de la materia orgánica mediante reacciones de oxidación (Breemen y Buurman 1998; Tisdall 1994, en Stott *et al.* 1999); así mismo, la remoción y/o quema de la cobertura vegetal, modifica la cantidad y calidad de los residuos orgánicos presentes en el suelo (Lowery *et al.* 1999; Jim 2003). La disminución en el carbono orgánico en los sitios de maizales, muestra que el cultivo continuo es una actividad antropogénica que tiende a agotar las reservas de materiales orgánicos en un suelo.

La alta variabilidad al interior de los sitios de estudio observada para la actividad de la enzima β -glucosidasa, no permite discernir los cambios en la actividad de la enzima asociados al cambio de uso del suelo. Durante los análisis en el laboratorio, se llevaron a cabo tres repeticiones por cada punto de muestreo y un par de blancos durante cada experimento, dejando limitada la posibilidad de error o contaminación en el laboratorio. Esta alta variabilidad de la enzima bajo condiciones naturales también fue reportada por Pérez de Mora *et al.* (2005).

Se conoce que el tipo y cantidad de compuestos orgánicos presentes en el suelo, afectan la actividad de la enzima β -glucosidasa (Álvarez y Guerrero 2000; Moorhead y Sinsabaugh 2000; Trasar-Cepeda *et al.* 2000, 2000a; Waldrop *et al.* 2000 y Kourtev *et al.* 2002). Al igual que el porcentaje de carbono orgánico, la actividad de la enzima β -glucosidasa presentó los valores más bajos en los sitios de maizales debido a que la actividad enzimática tiende a ser más sensible a las prácticas de labranza (Bandick y Dick 1999) y a los cambios en la concentración de carbono orgánico (Powlson *et al.* 1987 y Bergstrom *et al.* 1998, en Aon *et al.* 2001) que a otras propiedades del suelo, de hecho, se reconoce comúnmente que los contenidos de carbono orgánico y materia orgánica son las únicas propiedades del suelo que se correlacionan con la actividad de la β -glucosidasa (Eivazi y Tabatabai 1990; Doran 1980; Miller y Dick 1995, en Badiane *et al.* 2001).

Los valores obtenidos ($2218 \text{ mg PNP kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ - $4905 \text{ mg PNP kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$) durante la determinación de la actividad de la enzima β -glucosidasa comparativamente con otros estudios, son altos respecto a los valores reportados por Renella *et al.* (2004) ($\approx 500 \text{ mg PNP kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ - $\approx 2000 \text{ mg PNP kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$) y Pérez de Mora *et al.* (2005) ($\approx 100 \text{ mg PNP kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ - $\approx 1200 \text{ mg PNP kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$), pero totalmente diferentes con lo reportado por Taylor *et al.* (2002) ($<$

$2.5 \mu\text{g PNP g}^{-1} \text{ h}^{-1} - \approx 30 \mu\text{g PNP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$) siguiendo el método descrito por Tabatabai (1982) y Eivazi y Tabatabai (1988, en Alef y Nannipieri 1995) (Ver **Tabla 2.5e**).

Esta incompatibilidad de resultados, utilizando el mismo método ha sido discutida ampliamente (Gianfreda y Bollag 1996; Nannipieri y Gianfreda 1998) al definir indicadores para evaluar la calidad y degradación del suelo. Estas diferencias probablemente son debidas al tipo de suelo, a los tipos de vegetación, al contenido de carbono orgánico, a la influencia agrícola, así como a las condiciones de la muestra durante su análisis (Ver **Tablas 2.5h y 2.5i**). Por ejemplo, Renella *et al.* (2004) llevaron a cabo sus experimentos en suelos tanto arcillosos y arenosos, a los cuales adicionaron diferentes concentraciones de Cd en Burdeos, Francia; por su parte, Pérez de Mora *et al.* (2005), llevaron a cabo sus experimentos en suelos franco arcillosos mezclados con diferentes tipos de mejoradores orgánicos e inorgánicos en la región de Huelva, al sur de España. En ninguno de los dos casos se llevaron a cabo los experimentos en suelos tropicales, por lo tanto, pienso que la obtención de una alta actividad de esta enzima es debida al tipo de sistema en que se llevó a cabo el estudio y que es un indicador que requiere de validación posterior.

En cuanto a la actividad de la deshidrogenasa como indicador de degradación, provee de información general sobre la actividad de la microbiota y su actividad varía a través del tiempo; además, su actividad suele ser mayor en suelos bajo condiciones naturales que en suelos bajo uso productivo (García *et al.* 2002; Scardi *et al.* 2004).

Los valores obtenidos en este estudio, son bajos ($81.6 \text{ mg INTF kg}^{-1} \text{ h}^{-1} - 123.7 \text{ mg INTF kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$) respecto a los reportados por Fernández (2002) ($57 \text{ kg}^{-1} \text{ h}^{-1} - 568.40 \text{ mg INTF Kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$) para litosoles éutricos en una zona árida, usando el método descrito por Friedel *et al.* (1994)

(Ver Tabla **2.5f**). Probablemente la baja actividad de la deshidrogenasa respecto a lo reportado por Fernández (2002) se deba al tipo de suelo. Franzluebbers *et al.* (1996, en Madejón *et al.* 2001) explican que las actividades de la enzima deshidrogenasa y de la microbiota, son mayores en suelos arenosos que en suelos arcillosos, lo cual es observado en el presente estudio durante la elaboración de las correlaciones, obteniéndose correlaciones negativas con respecto al porcentaje de arcillas (-0.45) y positivas respecto al porcentaje de arenas (0.65). Camiña *et al.* (1998) por su parte, reportan interferencia debidas al tipo de suelo durante la extracción del INT-F. Pienso que probablemente la actividad de la deshidrogenasa fue afectada durante su cuantificación en el laboratorio, pudiendo existir interferencia en la extracción del producto INT-F durante los análisis debido, como se ha venido mencionando, al tipo de suelo (Ver **Tablas 2.5h y 2.5i**), a pesar de los controles internos de calidad ejecutados en el laboratorio (tres repeticiones, un blanco cada ocho muestras).

No se encontraron diferencias estadísticas entre los cuatro tipos de uso del suelo para la actividad de la deshidrogenasa, sin embargo, presenta una tendencia a decrecer bajo prácticas de cultivo. De acuerdo a Bergstrom *et al.* (1998, 2000, en Gil-Sotres *et al.* 2005), las actividades de cultivo, como el arado, pueden tanto incrementar como reducir su actividad, en nuestro caso, parece hacerla decrecer. La tendencia a reducir su actividad en los suelos de maizales indica que la microbiota es afectada por los procesos de degradación que reducen la cantidad de materia orgánica del suelo (Dick y Tabatabai 1993; Lynch 1994) y los que modifican su hábitat y disponibilidad de nutrimentos (Stott *et al.* 1999), como por ejemplo la compactación y reducción de la porosidad.

9.2 Indicadores químicos.

Los cuatro usos de suelo muestreados presentaron valores de pH de fuerte a moderadamente ácidos (4.8 – 5.3 pH). Como esperábamos, no se encontraron diferencias significativas en el pH, dado que es una propiedad muy difícil de modificar debido a la capacidad amortiguadora del suelo, dependiente del porcentaje de arcillas y del contenido de materia orgánica, y por tanto, se verá afectada sólo a largo plazo preferentemente por la acción de los factores formadores del suelo (Tan 1998; Sparks 2003) (Ver **Tabla 2.4c**).

El pH correlaciona negativamente con el porcentaje de carbono orgánico y el contenido de arcillas. Esto puede explicarse porque parte de la carga negativa del suelo es causada por la deprotonización de grupos carboxílicos y fenólicos de la materia orgánica, así como de grupos hidroxilos contenidos en las arcillas (Norton *et al.* 1999), por esta razón el pH ácido suele ser característico de suelos de selva, en donde la cantidad de materia orgánica es alta (USDA 1993).

Los cuatro usos de suelos corresponden a suelos no salinos (Smith y Doran 1996) debido a que presentan una conductividad eléctrica menor a $1400 \mu\text{S cm}^{-1}$. Los valores obtenidos varían entre $101 \mu\text{S cm}^{-1}$ y $48 \mu\text{S cm}^{-1}$. Los valores más bajos se presentan en los sitios de pastizales y maizales, respecto a las selvas y a los sistemas agroforestales.

De acuerdo a Arnold *et al.* (1990), la conductividad eléctrica es altamente variable espacial y temporalmente, siendo modificable en un corto periodo de tiempo, aproximadamente entre 10^{-1} – 10^0 años. La actividad antropogénica que disminuyó de forma evidente la conductividad eléctrica fue el cultivo de maíz, sin embargo, hace falta un seguimiento de la

conductividad eléctrica a través del tiempo para determinar si los cambios son debidos a la pérdida de nutrimentos o a la variabilidad de esta propiedad a través del tiempo o del espacio.

9.3 Indicadores físicos.

Las clases de textura de los suelos encontrados en el Ejido San Fernando, corresponden a suelos predominantemente arcillosos, principalmente en los usos de suelo bajo pastizales, algunos franco y franco arcillosos, y sólo un franco limoso y un franco areno limoso (Ver **Anexo 3**). La densidad real presentó valores de entre 2.29 g cm^{-3} – 2.48 g cm^{-3} . Como esperábamos, no se encontraron diferencias en estas características a consecuencia de un cambio en el uso del suelo.

Las densidades aparentes del suelo presentaron, en general, valores bajos de entre 0.47 g cm^{-3} – g cm^{-3} . El porcentaje de porosidad, que es una propiedad dependiente de la densidad aparente, presentó valores altos de entre 69.24 % - 79.96 %. Estas dos propiedades físicas son promisorias como indicadores de degradación ya que resultaron sensibles a los cambios de uso del suelo.

El observarse un aumento en los valores de la densidad aparente y una disminución de la porosidad bajo los tres usos antropogénicos del suelo, sugiere un proceso de compactación del mismo (NCR 1993; Lal 1994, 1997a; Oldeman 1994; Papendick 1994; Håkansson y Voorhees 1997; Elliot *et al.* 1999; Stott *et al.* 1999); esta situación se presenta más claramente en los maizales, debido a la pérdida de materia orgánica y al probable

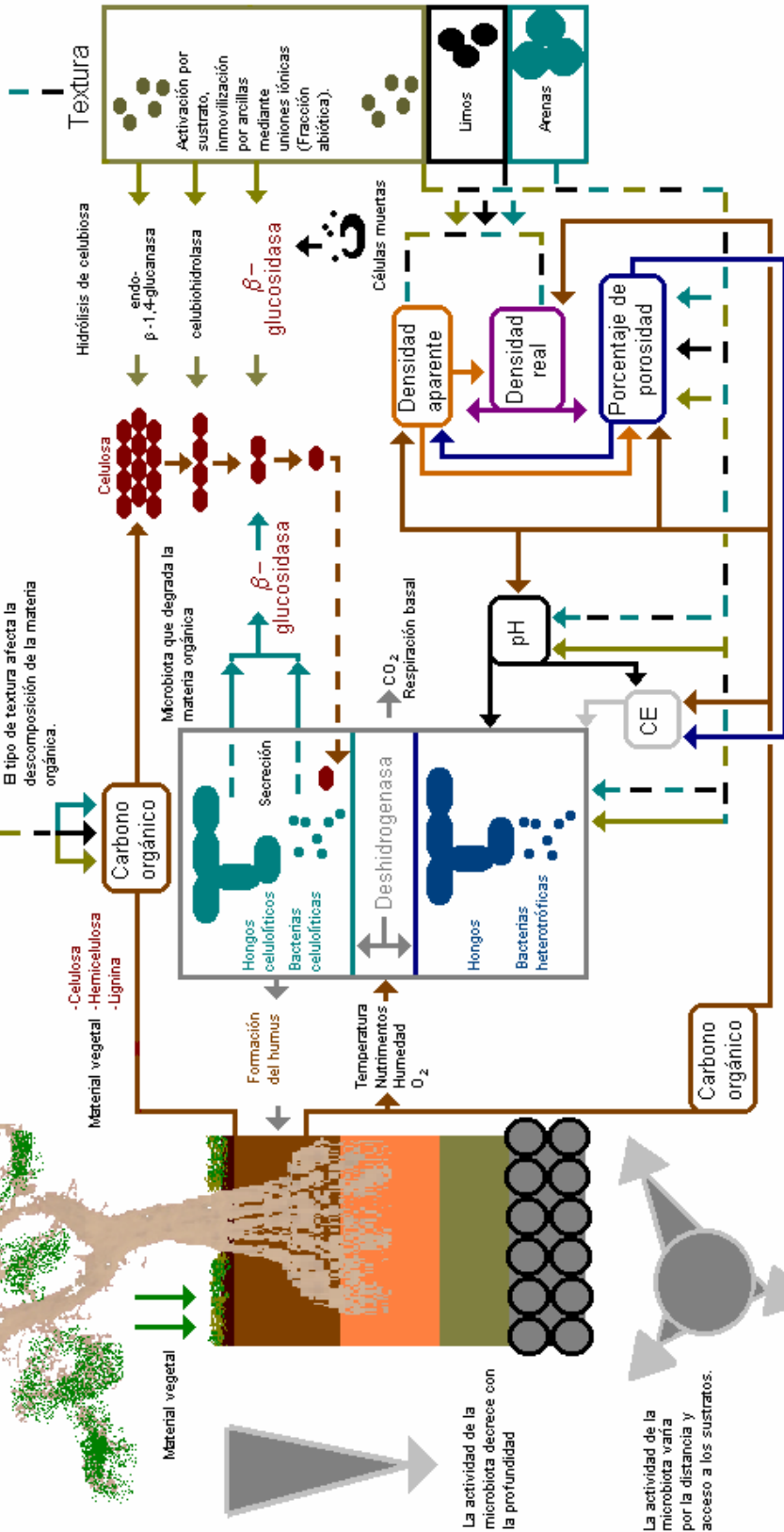
rompimiento de agregados producto de las prácticas de cultivo, pudiendo favorecer procesos erosivos de mayor intensidad (Frye *et al.* 1982, en Lal *et al.* 1999).

De acuerdo a Doran *et al.* (1999) y Elliot *et al.* (1996), el uso agrícola intensivo y continuo provocan compactación y pérdidas de estructura. La estructura del suelo es un atributo importante de la calidad física ya que regula el transporte y curso del agua de lluvia, así como procesos de respiración en el suelo (USDA 1993; Lal 1994; Hillel 1998); los procesos de degradación que pueden derivarse de la compactación de un suelo son la baja permeabilidad, baja infiltración y baja aireación, modificando el flujo y/o transporte de las fases líquidas y gaseosas del suelo, impidiendo el correcto crecimiento de las raíces, la toma de nutrimentos para las plantas, así como un decremento en la actividad de la microbiota del suelo, modificaciones en la descomposición de la materia orgánica (aumentándola y/o disminuyéndola) originando una pérdida en la fertilidad y productividad del suelo, es decir, en su calidad.

En la **Figura 9.3a** se muestra un diagrama de flujo en donde se pueden observar la forma en que se relacionan los indicadores de degradación biológicos, químicos y físicos evaluados en el presente trabajo, elaborado a partir de las revisiones bibliográficas hechas para cada parámetro.

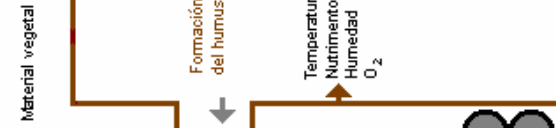
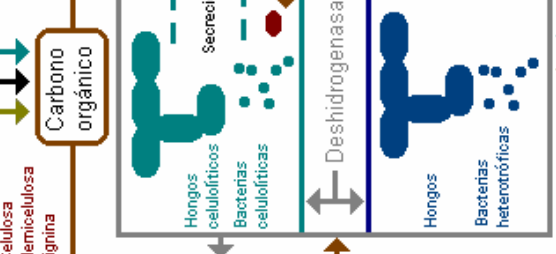
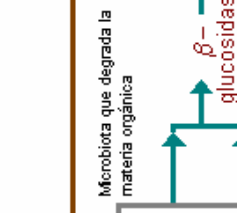
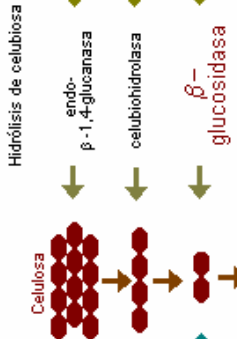
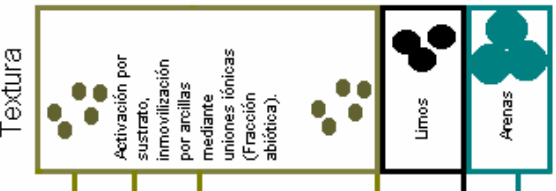
Fig 9.3a - Diagrama de flujo en donde se presentan los indicadores de degradación biológicos, químicos y físicos seleccionados en el presente trabajo. Las flechas representan las propiedades del suelo que afectan o por las que son afectadas.

Fotosíntesis
Con la entrada del carbono se sintetizan las dos formas de la glucosa α - y β - glucosa.



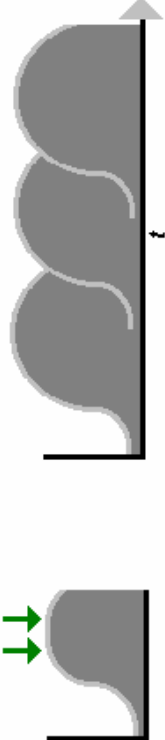
El tipo de textura afecta la descomposición de la materia orgánica.

Textura



La actividad de la microbiota decrece con la profundidad

La actividad de la microbiota varía por la distancia y acceso a los sustratos.



La actividad enzimática varía a través del tiempo, aumentando o decreciendo.

Los residuos de las plantas son la principal fuente energética de la microbiota del suelo. La calidad de los residuos de las plantas afectan la actividad de la microbiota.

9.4 Efectos del cambio de uso de suelo en los indicadores de degradación.

La calidad y la degradación del suelo son conceptos holísticos, que requieren de un amplio número de indicadores para cuantificarse y de una serie de mediciones para poder analizarse (Doran *et al.* 1999). La degradación del suelo no es específica, ni presenta los mismos valores en diferentes suelos (Eswaran 1994), por esta razón es conveniente delimitar los valores que determinan la calidad del suelo y hacer comparaciones basándonos en su estado original para determinar o cuantificar degradación del mismo. En la **Tabla 9.4a** se presentan la interpretación de los valores obtenidos en los indicadores de degradación del suelo seleccionados para la selva alta perennifolia respecto a los demás usos del suelo.

Tabla 9.4a – Interpretación de los indicadores de degradación comparados con la selva alta perennifolia. Se muestran los valores de las propiedades que resultaron diferentes a la selva. C.O. = carbono orgánico; BG = β -glucosidasa; DH = deshidrogenasa; C.E. = conductividad eléctrica; D.A. = densidad aparente, D.R. = densidad real.

| Tipo de vegetación | % C.O. | BG | DH | pH | C.E. $\mu\text{S cm}^{-1}$ | D.A. g cm^{-3} | D.R. | Textura | % Porosidad |
|--|---------------|-------------|-------------|----------------------------------|----------------------------|-------------------------|--------|-----------------------------|-------------|
| Maizal. | Bajo (3.6) | No definido | No defindo. | De fuerte a moderadamente ácido. | Baja (48.0) | Alta (0.82) | Normal | Predominantemente Arcilloso | Bajo (70.2) |
| Pastizal | Similar (5.8) | No definido | No defindo. | Fuertemente ácido. | Baja (61.6) | Alta (0.74) | Normal | Predominantemente Arcilloso | Bajo (69.2) |
| Sistemas agroforestales y cafetales abandonados. | Similar (5.2) | No definido | No defindo. | De fuerte a moderadamente ácido. | Similar (87.1) | Alta (0.72) | Normal | Predominantemente Arcilloso | Bajo (71.7) |

La selva alta perennifolia, como estado original del suelo, presentó un alto contenido de carbono orgánico, el cual respondió como indicador de la degradación del suelo; la alta variabilidad en la actividad enzimática (β -glucosidasa y deshidrogenasa) impidió observar diferencias estadísticas entre los usos de suelo y no respondió a las expectativas planteadas como un buen indicador de degradación. Propongo hacer un seguimiento para poder monitorear los cambios en el comportamiento de la actividad enzimática intra y extracelular ya que son propiedades que cambian en el tiempo y en el espacio.

La selva alta perennifolia presentó bajas densidades aparentes y altos porcentajes de porosidad respecto a los demás usos de suelo. Estas propiedades físicas son fácilmente modificadas bajo cualquier uso del suelo, y sus variaciones pueden provocar degradación del mismo, deduciendo en este caso, compactación del suelo.

Se observó que dependiendo del cambio de uso de suelo, se presentan diferentes efectos en las propiedades físicas y biológicas. Por ejemplo, a lo largo del tiempo la materia orgánica se va perdiendo en un sistema agrícola bajo laboreo continuo (maizal), pero en sitios bajo vegetación continua (sistemas agroforestales y pastizales) se mantienen las condiciones de carbono orgánico del suelo y no así, la densidad aparente y el porcentaje de porosidad.

Los pastizales y los sistemas agroforestales no se diferenciaron entre sí en ningún indicador de degradación evaluado. Sin embargo, se sabe que el cultivo de cafetal rústico es menos agresivo con las especies de plantas secundarias, y sirve como un corredor faunístico; mantiene el microclima, o sea que la temperatura y humedad son más parecidas a los sitios de selva alta perennifolia que en otros usos de suelo analizados (Toledo *et al.* 1972).

En la **Tabla 9.4b** presento un resumen de las ventajas y desventajas de cada indicador evaluado en el Ejido San Fernando, como guía para futuros trabajos similares a este

Tabla 9.4a- Ventajas y desventajas de los indicadores de degradación del suelo utilizados.

| Indicador de degradación | Presentó cambios por el uso de suelo. | Número de variables con las que correlacionó en el presente estudio. | Ventajas de su uso como indicador de degradación. | Desventajas como indicador de degradación. |
|--|--|---|---|--|
| 1. Carbono orgánico | Sí | 5 | Responde a cambios en el manejo y determina otras propiedades del suelo | Cambia lentamente. |
| 2. β-glucosidasa | No | 1 | Provee de información acerca de la descomposición de la materia orgánica por parte de la fracción abiótica del suelo. | Es altamente específica. Su actividad presenta variaciones estacionales y espaciales |
| 3. Deshidrogenasa | No | 3 | Provee de información acerca de la actividad oxidativa de la microbiota. | Es dependiente del tipo de suelo. Su actividad presenta variaciones estacionales y espaciales |
| 4. Ph | No | 4 | Esencial para llevar a cabo reacciones químicas por parte de la microbiota; determina la disponibilidad de nutrientes para las plantas. | Sólo es afectada primordialmente por los factores formadores del suelo o por un uso muy intensivo del suelo. |
| 5. Conductividad eléctrica | Sí | 4 | Responde rápidamente al cambio de uso de suelo y es esencial para conocer su salinidad. | Es fácilmente modificable. |
| 6. Textura | No | 3-4 | Determina otras propiedades físicas, biológicas y químicas del suelo como la porosidad, capacidad de retención de humedad, pH y capacidad de intercambio catiónico. | Sólo es afectada primordialmente por los factores formadores del suelo o por un uso muy intensivo del suelo. |
| 7. Densidad aparente | Sí | 4 | Responde rápidamente a la compactación y a la pérdida de materia orgánica. | Varía temporal y espacialmente a lo largo del terreno. |
| 8. Densidad Real | No | 3 | Determina otras propiedades físicas de los suelos. | Sólo es afectada primordialmente por los factores formadores del suelo o por un uso muy intensivo del suelo. |
| 9. Porcentaje de porosidad | Sí | 3 | Responde rápidamente a la compactación y a la pérdida de materia orgánica. | Varía temporal y espacialmente a lo largo del terreno. |

10 CONCLUSIONES

- ✓ Los cambios más drásticos de los indicadores de degradación considerados ocurrieron en los maizales; resaltando que la actividad antropogénica que de forma evidente reduce la calidad del suelo y aumenta su potencial de degradación es el cultivo de maíz.

- ✓ Las actividades de las enzimas β -glucosidasa y deshidrogenasa, no resultaron estadísticamente diferentes al comparar los usos del suelo considerados en este trabajo. Su potencial como indicador de degradación no pudo establecerse en este trabajo y requiere de más estudios y atención a futuro. Se observó un decremento en sus actividades bajo el cultivo de maíz.

- ✓ El porcentaje de carbono orgánico fue la única propiedad biológica que mostró potencial para ser utilizada como indicador de degradación del suelo debido a cambio de uso del mismo. Los valores más bajos se presentaron en los maizales, sugiriendo pérdida de la materia orgánica debido a las prácticas de cultivo.

- ✓ La densidad aparente y el porcentaje de porosidad también mostraron potencial como indicadores de degradación. Los cambios en estas propiedades sugieren un proceso de compactación del suelo en los tres usos antropogénicos considerados.

- ✓ La conductividad eléctrica disminuyó a consecuencia del cambio en el uso del suelo. Se atribuyen estos cambios a la alta sensibilidad de esta propiedad a ser modificada en un corto periodo de tiempo, no resultando atractiva como indicador de degradación, dado que los cambios pueden deberse a múltiples factores como: la aplicación de fertilizantes, plaguicidas o en general, a prácticas agrícolas dirigidas a crear un ambiente adecuado solamente durante el ciclo productivo.

- ✓ El pH, la densidad real y la textura no mostraron cambios debido a que no son modificables en los intervalos de tiempo considerados en este trabajo.

11 BIBLIOGRAFÍA

1. Alef, K. y Nannipieri, P. Editores (1995) *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*, *Academic Press*, Londres, 1995.
2. Álvarez, S. y Guerrero, M.C. (2000) Enzymatic activities associated with decomposition of particulate organic matter in two shallow ponds, *Soil Biology & Biochemistry* **32**: 1941-1951
3. Arnold, R.W.; Szabolcs, V. y Targulian, O. (1990) Global Soil Change: Report of an IIASA-ISSS-UNEP Task force of soil in global change, *International Institute for Applied System Analysis*, Laxenburg, Austria, 110p.
4. Arshad, M.A.; Lowery, B. y Grossman, B. (1996) Physical test for monitoring soil quality, en *Methods for assessing soil quality*, *SSSA Special Publication* No. 49, EUA, p123-141.
5. Aon, M.A.; Cabello, M.N.; Sarena, D.E.; Colaneri, A.C.; Franco, M.G.; Burgos, J.L. y Cortassa, S. (2001) I. Spatio-temporal patterns of soil microbial and enzymatic activities in an agricultural soil, *Applied Soil Ecology* **18**: 239-254.
6. Aon, M.A. y Colaneri, A.C. (2001) II. Temporal and spatial evolution of enzymatic activities and physico-chemical properties in an agricultural soil, *Applied Soil Ecology* **18**: 255-270

7. Bandick, A.K. y Dick, R.P. (1999) Field management effects on soil enzyme activities, *Soil Biology & Biochemistry* **31**: 1471-1479
8. Barrow, J.C. (1991) Land degradation, *Cambridge University*, NY, 295p.
9. Blum, W.E. (1997) Basic Concepts: Degradation, resilience and rehabilitation, en *Methods for assessment of soil degradation* (Lal, R.; Blum, W.H.; Valentine, C. y Stewart, B.A. Editores), *CRC press*, NY, p1-16
10. Brady, N. (1974) The nature and properties of soils, *Mac Millan Publishing, Co., Inc.*, 8ª edición, NY, 639p.
11. Brejda, J.J.; Karlen, D.L.; Smith, J.L. y Allan, D.L. (2000) Identification of regional soil quality factors and indicators: II. Northern Mississippi Loess Hills and Palouse Prairie, *Soil Sci. Soc. Am. J.* **64**: 2125-2135
12. Breemen, N.V. y Buurman, P. (1998) Soil Formation, *Kluwer Academic Publisher*, AH Dordrecht, Holanda, 377p.
13. Brock, B.G. (1999) ⌘ for soil quality = Long-term no-till, en *Soil quality and soil erosion* (Lal, R. editor) *CRC press*, Londres, 169-172p.
14. Cambell, D.J y Henshall, J.K. (1991) Bulk density, en *Soil analysis physical methods book: Soil, plants and the enviroment* (Smith, K.A. y Mullins, C.E. Editores) *Marcel Dekker Inc. press*, NY, 329-366p.

15. Camiña, F.; Trasar-Cepeda, C.; Gil-Sotres, F. y Leirós, C. (1998) Measurement of dehydrogenase activity in acid soils rich in organic matter, *Soil. Boil. Biochem.* **30**: 8/9 1005-1011

16. Carabias, L.M.J. (1979) Análisis de la vegetación de la selva alta perennifolia y comunidades derivadas de esta en una zona cálido-húmeda de México, Los Tuxtlas, Veracruz. *Tesis de Licenciatura*, Facultad de Ciencias, Biología, Universidad Nacional Autónoma de México.

17. Carabias, J.; Arriaga, V. y Cervantes V. (1994) Los recursos naturales de México y el desarrollo. En: *Desarrollo, desigualdad y medio ambiente* (Moncayo P.P. y Woldenberg, P. Coordinadores), *Cal y Arena*, México, p303-345.

18. Castro, G.J.E. (1996) Los suelos tropicales de México, I Génesis dinámica y degradación. *Tesis de Doctorado*, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.

19. Cruz, R.E.R. (1992) Características y distribución de la materia orgánica en relación con la altitud en suelos cafetaleros de coatepec, Veracruz. *Tesis de Licenciatura*, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.

20. Cruz y Cruz, G (1992) Estudio de la producción de miel, en tres años consecutivos en los municipios de Soteapan, Mecayapan y Pajapan, pertenecientes a los grupos étnicos del sur de los Tuxtlas, Veracruz. *Tesis*

de Licenciatura, Facultad de Medicina, Veterinaria y Zootecnia, Universidad Nacional Autónoma de México.

21. De la Paz, J. M.; De la Horra, A.M.; Pruzzo, L. y Palma, R.M. (2002) Soil quality: a new index based on microbiological and biochemical parameters, *Biol Fertil Soils* **35**: 302-306
22. Debosz, K; Rasmussen, P.H. y Pedersen, A.R. (1999) Temporal variations in microbial biomass C and cellulolytic enzyme activity in arable soils: effects of organic matter input, *Applied Soil Ecology* **13**: 209-218
23. Dick, W.A. y Tabatabai, M.A. (1993) Significance and potential uses of soil enzymes. En *Soil microbial ecology: Applications in agricultural and environmental management* (F. Blaine Metting, Editor), Marcel Dekker Inc. press, NY, p95-127
24. Doran, J.W. y Parkin, T.B. (1996) Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set, en *Methods for assessing soil quality*, SSSA Special Publication No. 49, EUA, p25-37.
25. Doran, J.W.; Jones, A.J.; Arshad, M.A. y Gilley, J.E. (1999) Determinants of soil quality and health, en *Soil quality and soil erosion* (Lal, R. Editor) CRC press, Londres, p17-36.
26. Dregne, H.E. (1997) Desertification Assessment, en *Methods for assessment of soil degradation* (Lal, R.; Blum, W.H.; Valentine, C. y Stewart, B.A. Editores), CRC press, NY, p441-457.

27. Duchaufour, P. (1977) Atlas ecológico de los suelos del mundo, *Balmes: Toray-Masson*, 178p.
28. Eivazi, F. y Tabatabai, M.A. (1990) Factors affecting glucosidase and galactosidase activities in soils, *Soil Biology & Biochemistry* **22**: 891-897
29. Elliot, W.J.; Page-Dumroese, D. y Robichaud, P.R. (1999) The effects on forest management on erosion and soil productivity, en *Soil quality and soil erosion* (Lal, R. editor) *CRC press*, Londres, p195-208.
30. Eswaran, H. (1994) Soil resilience and sustainable land management in the context of AGENDA 21, en *Soil resilience and sustainable land use*, (Greenland, D.J. y Szabolcs, I. Editores), *CAB international*, 21-32p.
31. Fenton, T.E.; Brown, J.R. y Mausbach, M.J. (1999) Effect of long-term cropping on organic matter content of soils: Implications for soil quality, en *Soil quality and soil erosion* (Lal, R. editor) *CRC press*, Londres, 95-124p.
32. Fernández, L.P. (2002) Especiación de arsenico y su relación con la actividad enzimática (deshidrogenadas) en los suelos de las inmediaciones de una presa de Jales en el estado de Zacatecas. *Tesis de Maestría*, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.
33. Friedel, J.K.; Mólter, K. y Fischer, W.R. (1994) Comparison and improvement of methods for determining soil dehydrogenase activity by using

triphenyltetrazolium chloride and idonitrotetrazolium chloride, *Biol. Fertil Soils* **18**: 291-296

34. García C. y Hernández, T. (1997) Biological and Biochemical indicators in derelict soils subject to erosion, *Soil Biology & Biochemistry* **29**: 2, 171-177
35. García, C.; Hernández, T.; Roldan, A. y Martín, A. (2002) Effect of plant cover decline on chemical and microbiological parameters under Mediterranean climate, *Soil Biology & Biochemistry* **34**: 635-642
36. Gianfreda, L. y Bollag, J.M. (1996) Influence of natural and anthropogenic factors on enzyme activity in soil, en *Soil Biochemistry Vol. 9* (Stotzky, G. y Bollag, J.M. Editores), *Marcel Dekker Inc. press*, NY, p123-193.
37. Gil-Sotres, F.: Trasar-Cepeda, C.; Leirós, M.C. y Seoane, S. (2005) Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties, *Soil Biology & Biochemistry* **37**:5, 877-887
38. Gómez-Pompa, A. y Ludlow, W.B. (1976) Regeneración de los ecosistemas tropicales y subtropicales, en *Investigaciones sobre la regeneración de selvas altas en Veracruz, México* (Gómez-Pompa, A., del Amo, R.S. y Vazquez-Yanes, C. Editores) *Continental*, México, p11-24.
39. González C. M. E. (1991) Regionalización climática de la Sierra Santa Martha y el Volcán San Martín Pajapan, Veracruz. *Tesis de Maestría*, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.

40. Grossman, R.B. y Reinsch, T.G. (2002) Bulk density and linear extensibility, en *Methods of soil analysis Part 4: Physical Methods* (Dane, J.H. y Topp, G.C. Editores), SSSA Inc. p201-254.
41. Guevara, S.; Laborde, J.; Liesenfeld, D. y O. Barrera (1997) Potrerros y Ganadería, en: *Historia natural de Los Tuxtlas* (González-Soriano, E.; Dirzo, E. y Richards V. Editores) *Instituto de Biología*, Universidad Nacional Autónoma de México.
42. Hartemink, A.E. (2003) Human population and soil degradation, en *Soil fertility decline in the tropics with case studies on plantations*, CABI Publishing, p10-60.
43. Hayano, K. y Katami, A. (1977) Extraction of β -glucosidase activity from PEA field soil, *Soil Biology & Biochemistry* **9**: 349-351
44. Håkansson, I. y Voorhees, W.B. (1997) Soil compaction, en *Methods for assessment of soil degradation* (Lal, R.; Blum, W.H.; Valentine, C. y Stewart, B.A. Editores), CRC press, NY p167-179.
45. Hillel, D. (1998) Environmental Soil Physics, *Academic Press*, EUA, 771p.
46. Ibarra-Manriquez, G. (1985) Estudios preliminares sobre la flora leñosa de la estación de Biología Tropical "Los Tuxtlas", Veracruz, México. *Tesis de Licenciatura*, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.

47. INEGI (1984) Carta Edafológica Coatzacoalcos E15-1-4. esc. 1:250,000. S.P.P. México.
48. INEGI (1984a) Carta Topográfica San Juan Volador E15-A-74. esc. 1:50,000. S.P.P. México.
49. INEGI (1984b) Carta digital con coordenadas vectoriales San Juan Volador E15-A-74. esc. 1:50,000. S.P.P. México.
50. ISO 10390: 1994 (E) - Soil Quality – Determination of pH.
51. ISO 11265: 1994 (E) - Soil Quality – Determination of the specific electrical conductivity.
52. ISO 11272: 1998 (E) - Soil quality – Determination of dry bulk density.
53. ISO 11464: 1994 (E) - Soil Quality – Pretreatment of samples of physic – chemical analyses.
54. ISO 11465:1993 (E) - Soil Quality – Determination of dry matter and content on a mass basis – Gravimetric method.
55. ISO 11508: 1998 (E) - Soil Quality – Determination of particle density.
56. ISO 14235: 1994 (E) - Soil Quality – Determination of organic carbon of sulfochromic oxidation.

57. ISO 11277: 1998 (E) - Soil Quality – Determination of particle distribution in mineral soil material – Method by sieving and sedimentation, método del hidrómetro.
58. Jim, C.Y. (2003) Soil recovery from human disturbance in tropical woodlands in Hong Kong, *Catena* **52**: 85-103
59. Kourtev, P.S.; Ehrenfeld, J.G. y Huang, W.Z. (2002) Enzyme activities during litter decomposition of two exotic and two native species in hardwood forest of New Jersey, *Soil Biology & Biochemistry* **34**: 1207-1218
60. Lal, R. (1994) Sustainable land use systems and soil resilience, en *Soil resilience and sustainable land use*, (Greenland, D.J. y Szabolcs, I. Editores), *CAB international*, p41-67.
61. Lal, R. (1997) Soil quality and sustainability, en *Methods for assessment of soil degradation* (Lal, R.; Blum, W.H.; Valentine, C. y Stewart, B.A. Editores), *CRC press*, NY, p17-30.
62. Lal, R. (1997a) Agronomic impact of Soil Degradation, en *Methods for assessment of soil degradation* (Lal, R.; Blum, W.H.; Valentine, C. y Stewart, B.A. Editores), *CRC press*, NY, p459-473.
63. Lal, R. (1999) Soil quality and food security: The global perspective, en *Soil quality and soil erosion* (Lal, R. editor) *CRC press*, Londres, p3-16.

64. Lal, R.; Mokma, D. y Lowery, B. (1999) Relation between soil quality and erosion, en *Soil quality and soil erosion* (Lal, R. editor) *CRC press*, Londres, p237-258.
65. Lira, N. D. (2003) La vegetación de los potreros del norte de La Sierra de Los Tuxtlas. *Tesis de Licenciatura*, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.
66. Lowery, B.; Hart, G.L.; Bradford, J.M.; Kung, K-J.S. y Huang, C. (1999) Erosion impact on soil quality and properties and model estimates of leaching potential, en *Soil quality and soil erosion* (Lal, R. editor) *CRC press*, Londres, p75-91.
67. Lynch, J.M. (1994) The biological dimension of soil resilience: the impact of molecular biology, en *Soil resilience and sustainable land use* (Greenland, D.J. y Szabolcs, I. Editores), *CAB international*, p69-76.
68. Madejón, E.; Burgos, P.; López, R. y Cabrera, F. (2001) Soil enzymatic response to addition of heavy metals with organic residues, *Biol Fertil Soils* **34**: 144-150
69. Moorhead, D.L. y Sinsabaugh, R.L. (2000) Simulated patterns of litter decay predict patterns of extracellular enzymes activities, *Applied Soil Ecology* **14**: 71-79

70. Muckel, G.B. y Mausbach, M.J. (1996) Soil quality information sheets, en *Methods for assessing soil quality, SSSA Special Publication No. 49*, EUA, p393-400.
71. Nannipieri, P.; Greco, S. y Ceccanti, B. (1990) Ecological significance of the biological activity in soil, en *Soil Biochemistry Vol. 6* (Bollag, J.M. y Stotzky, G. Editores), *Marcel Dekker Inc. press*, NY, p293-355.
72. Nannipieri, P. y Gianfreda, L. (1998) Kinetics of enzyme reactions in soil environments, en *Structure and surface reactions of soil particles Vol. 4* (Huang, P.M.; Senesi, N. y Buffle, J. Editores) *John Wiley & Sons*, p41-77.
73. Nannipieri, P.; Kalender, E. y Ruggiero, P. (2002) Enzyme activities and microbiological and biochemical processes in soil, en *Enzymes in the environment: Activity, ecology and applications* (Burns, R.G. y Dick, R.P. Editores), *Marcel Dekker Inc. press*, NY, p1-33.
74. National Research Council (1993) Soil and water quality – An agenda for agricultura, *The National Academy of Science press*, 516p.
75. Norton, D.; Shainberg, I.; Cihacek, L. y Edwards, J.H. (1999) Erosion and soil chemical properties, en *Soil quality and soil erosion* (Lal, R. editor) *CRC press*, Londres, p39-56.
76. Odum, E. (1972) *Ecología*, 3ª edición, México, Interamericana, 639p.

77. Oldeman, L.R. (1994) The global extent of soil degradation, en *Soil resilience and sustainable land use* (Greenland, D.J. y Szabolcs, I. Editores), *CAB international*, p99-118.
78. Pankhurst, C.E. (1994) Biological indicators of soil health and sustainable productivity, en *Soil resilience and sustainable land use* (Greenland, D.J. y Szabolcs, I. Editores), *CAB international*, p331-351.
79. Papendick, R.I. (1994) Maintaining soil physical conditions, en *Soil resilience and sustainable land use* (Greenland, D.J. y Szabolcs, I. Editores), *CAB international*, p215-234.
80. Pérez de Mora, A.; Ortega-Calvo, J.J.; Cabrera, F. y Madejón, E. (2005) Changes in enzyme activities and microbial biomass after "in situ" remediation of a heavy metal-contaminated soil. *Applied Soil Ecology* **28**: 125-137
81. Pedraza-Gilsanz, J., Carrasco, G.R. Editores (1996) Geomorfología: Principios, Métodos y Aplicaciones, *Rueda*, Madrid, 414p.
82. Plaster, E.J. (1997) La ciencia del suelo y su manejo, Título original: *Soil Science & Management*, Traducción Scott, P., *Thomson*, 419p.
83. Rahimi, H.; Pazira, E. y Tajik, F. (2000) Effect of soil organic matter, electrical conductivity and sodium adsorption ratio on tensile strength of aggregates. *Soil & Tillage Research* **54**: 145-153.

84. Renella, G.; Mench, M.; van der Lelie, D.; Pietramellara, G.; Ascher, J.; Ceccherini, M.T.; Landi, L. y Nannipieri, P. (2004) Hydrolase activity, microbial biomass and community structure in long-term Cd-contaminated soils, *Soil Biology & Biochemistry* **36**: 443-451
85. Rico B.M.F. (1972) Estudio de la sucesión secundaria en la estación de biología tropical "Los Tuxtlas". *Tesis de Licenciatura*, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.
86. Ríos M. F. (1952) Estudio geológico de la región de Los Tuxtlas, Ver. *Tesis de Licenciatura*, Universidad Nacional Autónoma de México.
87. Rzedowski, J. (1978) Vegetación de México, *Limusa*, México, 432p
88. Saviozzi, A.; Levi-Minzi, R. y Riffaldi, R. (2001) A comparison of soil quality in adjacent cultivated, forest and native grassland soils. *Plant and Soil* **233**: 251-259
89. Scardi, M; García-Préchac, F y Frioni, L; (2004) Soil microbial indicators sensitive to land use conversion from pastures to commercial *Eucalyptus grandis* (Hill ex Maiden) plantations in Uruguay; *Applied Soil Ecology* **27**: 125-133
90. Smith, J.L. y Doran, J.W. (1996) Measurement and use of pH and electrical conductivity for soil quality analysis, en *Methods for assessing soil quality*, *SSSA Special Publication No. 49*, EUA, p169-185.

91. Siebe, C.; Jahn, R. y Stahr, K. (1996) Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C., *Publicación Especial 4*.
92. Sommer-Cervantes, I; Flores-Delgadillo, L. y Gutiérrez-Ruiz, M. (2003) Caracterización de los suelos de la Estación Biológica Tropical Los Tuxtlas, en: *Ecología del suelo en la Selva Tropical Húmeda de México* (Álvarez-Sánchez, J. y Naranjo-García, E., Editores), *Facultad de Ciencias*, Universidad Nacional Autónoma de México p17-67.
93. Sparks, D.L. (2003) Environmental soil chemistry, 2ª edición. *Academic Press*, 325p.
94. Stott, D.E.; Kennedy, A.C. y Cambardella, C.A. (1999) Impact of soil organisms and organic matter on soil structure, en *Soil quality and soil erosion* (Lal, R. editor) *CRC press*, Londres, p57-73.
95. Sumner, M.E.; Fey, M.V. y Noble, A.D. (1991) Nutrient status and toxicity problems in acid soils, en *Soil Acidity* (Ulrich, B. y Sumner, M.E. Editores), *Springer-Verlag*, Alemania, p149-182.
96. Szabolcs, I. (1994) The concept of soil resilience, en *Soil resilience and sustainable land use* (Greenland, D.J. y Szabolcs, I. Editores), *CAB international*, p33-39.

97. Tabatabai (1982) Assay of the β -glucosidase activity, en *Methods in applied soil microbiology and biochemistry* (Alef, K. y Nannipieri, P. Editores), *Academic Press*, Londres, 1995.
98. Tabatabai (1994) Soil Enzymes, en *Methods of Soil Analysis, Part 2 Microbiological and Biochemical Properties*, *SSSA Inc*, p775-833.
99. Tan, K.H. (1996) Soil sampling, preparation and analysis, *Marcel Dekker Inc. press*, NY, 408p.
100. Tan, K.H. (1998) Principles of soil chemistry, 3^a edición, *Marcel Dekker Inc. press*, NY, 521p.
101. Tan, K.H. (2000) Soils and the environment, en: *Environmental Soil Science*, (Tan, K.H. Ed.), 2^a edición, *Marcel Dekker Inc. press*, NY, 452p.
102. Taylor, J.P.; Wilson, B.; Mills, M.S. y Burns, R.G. (2002) Comparison of microbial numbers and enzymatic activities in surface soils and subsoils using various techniques, *Soil Biology & Biochemistry* **34**: 387-401
103. Thompson, L.M. y Troeh, F.R. (1982) Los suelos y su fertilidad, 4^a edición, *Reverté*, Barcelona, 649p.
104. Toledo, V.M.; Guevara, S.; Hernández, J.; Collazo, M.; Flores, J.S.; Amaya, L.; Flores, F.; Pardavé, M; Signoret, G.; Calderón, C.; Colinas, M.; Sánchez, C.; Aguilar, A.; Romero, J.; Arvizu, M.; Cabrera, A. y Chávez, S. (1972) El ejido: Un intento de interpretación ecológica, en *Problemas*

biológicos de la región de los Tuxtlas, Veracruz. Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 237p.

105. Trasar-Cepeda, C.; Leirós, M.C.; Seoane, S. y Gil-Sotres, F. (2000) Limitations of soil enzymes as indicators of soil pollution, *Soil Biology & Biochemistry* **32**: 1867-1875
106. Trasar-Cepeda, C.; Leirós, M.C., y Gil-Sotres, F. (2000a) Biochemical properties of acid soils under climax vegetation (Atlantic oakwood) in an area of the European temperate-humid zone (Galicia, NW Spain): specific parameters, *Soil Biology & Biochemistry* **32**: 747-755
107. Turner, B.L.; Hopkins, D.W.; Haygarth, P.M. y Ostle, N. (2002) β -Glucosidase activity in pasture soils, *Applied Soil Ecology* **20**: 157-162.
108. USDA, (1993) Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos – Laboratorio de salinidad de EUA (Richards, L.A. Editor) *Limusa*, 7ª reimpresión.
109. USDA, (1996) Soil Quality Information Sheet – Natural Resources Conservation Service, Abril. <http://soils.usda.gov>
110. Waldrop, M.P.; Balser, T.C. y Firestone, M.K. (2000) Linking microbial community composition to function in a tropical soil, *Soil Biology & Biochemistry* **32**: 1837-1846

111. Warman, A.; Montañez, C.; Camou, E.; Andrade, J.L.; Peña, E.; Arias, R.; Velásquez, E. y Chávez, S. (1982) El cultivo del maíz en México: Diversidad, limitaciones y alternativas. Seis estudios de caso. *Centro de Ecodesarrollo*. México 146p.

Páginas WEB:

www.iespana.es/natureduca/cienc_suelo_formac.htm

ANEXO 1 Características de los sitios de muestreo.

Tabla A.1.1- Clasificación de los 8 puntos de selva muestreados en el Ejido San Fernando (*) pendiente no registrada. Se muestra la clave de campo y (b) = clave modificada por el proyecto para denominar los sitios de muestreo (valido para todos los sitios).

| Clave de campo | Clave de campo ^b | Tipo de vegetación | Pendiente |
|----------------|-----------------------------|--------------------------|-----------|
| SF09-S | PSF05 | Selva alta perennifolia. | * |
| SF10-S | PSF05 | Selva alta perennifolia. | * |
| SF01-S | PSF13 | Selva alta perennifolia. | * |
| SF03-S | PSF13 | Selva alta perennifolia. | * |
| SF06-S | PSF05 | Selva alta perennifolia. | 6° -12° |
| SF05-S | PSF05 | Selva alta perennifolia. | * |
| SF07-S | PSF05 | Selva alta perennifolia. | * |
| SF05-S | PSF05 | Selva alta perennifolia. | * |
| SF04-S | PSF05 | Selva alta perennifolia. | * |

Tabla A.1.2- Clasificación de los 8 maizales muestreados en el Ejido San Fernando; (-) maizal que no está bien documentado, no hay datos de primer desmonte ni de cultivos previos; (q) uso de químicos; (a) maizales con cultivo de 15 años; (b) maizales con cultivo de 10 años; (c) maizales con cultivo de 5 años; (d) maizales con cultivo de 4 a 5 años; (+) cultivo temporal, 1 vez cada año; (cz) cultivo de calabaza, previo al maíz; (fi) cultivo de frijol previo al maíz; (ji) cultivo de jitomate previo al maíz; (1) primer desmonte en 1960; (2) primer desmonte en 1965; (3) primer desmonte en 1988; (4) primer desmonte en 1993; (*) pendiente no registrada.

| Clave de campo | Clave de campo ^b | Tipo de vegetación | Pendiente |
|----------------|-----------------------------|--|-----------|
| SF04-M | PSF06 | Maíz; con barbecho y mucuna (1 año maíz seguido por 1 año de barbecho); sedentario ^{(q), (a), (+), (fi), (ca), (3)} | 12° - 18° |
| SF05-M | PSF06 | Maíz; con barbecho y mucuna (1 año maíz seguido por 1 año de barbecho); sedentario ^{(q), (a), (+), (fi), (ca), (3)} | 6° - 12° |
| SF38-M | PSF09 | _(q) | 0° - 6° |
| SF35-M | PSF07 | Maíz; sin barbecho y con mucuna (se siembra cada año); sedentario ^{(q), (b), (+), (4)} | 6° - 12° |
| SF39-M | PSF07 | Maíz; sin barbecho y con mucuna (se siembra cada año); sedentario ^{(q), (b), (+), (4)} | 0° - 6° |
| SF36-M | PSF08 | Maíz; con barbecho (5 años maíz, 5 años de barbecho); sedentario ^{(q), (c), (+), (fi), (ca), (ji), (1)} | 12° - 8° |
| SF01-M | PSF08 | Maíz; con barbecho (4 años maíz y después acahual; ciclo previo - 4 años maíz, 30 años acahual); sedentario ^{(q), (d), (+), (fi), (ca) (1)} | * |
| SF03-M | PSF05 | Maíz; con barbecho (4 años maíz y después acahual; ciclo previo - 4 años maíz, 30 años acahual); sedentario ^{(d)(+), (fi), (ca), (ji), (2)} | * |

Tabla A.1.3- Clasificación de los 8 pastizales en el Ejido San Fernando; (-) pastizal que también presenta maíz policultivo, pastoreo de caballos no hay datos de primer desmonte, no hay ganado; (+) pasto “estrella”, se cultivó durante 1967 y 1974 maíz, a partir de 1984 se cultivó pasto estrella; (++) acahualado cultivo de maíz, y frijol hasta 1994, se dejó acahualar y después se cultivó pasto insurgente para el ganado; (q) químicos en la parcela.

| Clave de campo | Clave de campo ^b | Tipo de vegetación | Pendiente |
|----------------|-----------------------------|-------------------------------------|-----------|
| SF07-P | PSF10 | Pastizal c/ vacas ^{(+)(q)} | 0° - 6° |
| SF03-P | PSF10 | Pastizal c/ vacas ^{(+)(q)} | 0° - 6° |
| SF05-P | PSF10 | Pastizal c/ vacas ^{(+)(q)} | 6° - 12° |
| SF10-P | PSF12 | _(^q) | 18° - 35° |
| SF01-P | PSF10 | Pastizal c/ vacas ^{(+)(q)} | 0° - 6° |
| SF04-P | PSF10 | Pastizal c/ vacas ^{(+)(q)} | 6° - 12° |
| SF08-P | PSF11 | Pastizal c/ vacas ⁽⁺⁺⁾ | 18° - 35° |
| SF06-P | PSF10 | Pastizal c/ vacas ^{(+)(q)} | 6° - 12° |

Tabla A.1.4- Clasificación de los 8 sistemas agroforestales en el Ejido San Fernando; (-) hubo anteriormente cultivo de maíz; (af) árboles frutales; (cj) café mejorado ; (cc) café criollo; (ce) existió cultivo de cacahuate; (cf) café no especificado; (1) primer desmonte en 1955; (2) primer desmonte en 1984; (3) primer desmonte en 1973; (4) primer desmonte en 1993.

| Clave de campo | Clave de campo ^b | Tipo de vegetación | Pendiente |
|----------------|-----------------------------|---|-----------|
| SF20-A | PSF04 | Café Rústica ^{(cc), (ce), (cj) (af), (1)} | 18° - 35° |
| SF19-A | PSF04 | Café Rústica ^{(cj) (af) (cc), (1)} | 0° - 6° |
| SF11-A | PSF01 | Café Rústica ^{(-), (cc), (ce), (cj) (2)} | 0° - 6° |
| SF17-A | PSF03 | Café Rústica ^{(cj), (cc), (ce) (3)} | 0° - 6° |
| SF15-A | PSF02 | Acahual y café abandonado ^{(cj) (4)} | 0° - 6° |
| SF14-A | PSF02 | Acahual y café abandonado ^{(cf), (cj) (4)} | 6° - 12° |
| SF13-A | PSF02 | Acahual y café abandonado ^{(cj) (af) (4)} | 0° - 6° |
| SF16-A | PSF02 | Acahual y café abandonado ^{(cj) (4)} | 12° - 18° |

ANEXO 2 - Resultados de los análisis en los indicadores biológicos por sitio de muestreo.

Resultados de los análisis de las propiedades biológicas y bioquímicas del suelo en el Ejido San Fernando.

Tabla A.2.1– Resultados de los indicadores biológicos en los ocho sitios de selva.

| CLAVE DE CAMPO | CLAVE LAFQA | β -glucosidasa mgPNP kg ⁻¹ h ⁻¹ | DesvEst | Deshidrogenasa mgINTF kg ⁻¹ h ⁻¹ | DesvEst | % Carbono Orgánico | DesvEst |
|-------------------------|-------------|--|---------|---|---------|-----------------------|---------|
| SF 9-S | 053-04 | 598.42 | 253.20 | 144.662 | 12.26 | 4.53 | - |
| SF 4-S | 056-04 | 590.23 | 23.50 | 95.493 | 11.63 | 5.00 | - |
| SF 7-S | 052-04 | 957.48 | 326.57 | 133.803 | 4.18 | 4.66 | - |
| SF 2-S | 055-04 | 2711.95 | 1063.77 | 109.964 | 6.96 | 5.92 | - |
| SF 6-S | 051-04 | 2930.37 | 703.24 | 122.435 | 12.34 | 5.11 | - |
| SF 10-S | 054-04 | 4294.67 | 1202.08 | 76.459 | 9.48 | 6.98 | - |
| SF 5-S | 050-04 | 7674.347 | 696.39 | 128.948 | 12.89 | 7.08 | - |
| SF 1-S | 049-04 | 9550.990 | 1391.61 | 85.309 | 1.46 | 9.23 | - |
| Promedio general | | 3663.56 | 3354.17 | 112.13 | 24.47 | 6.06 | 1.62 |

Tabla A.2.2– Resultados de los indicadores biológicos en los ocho sitios de maizales.

| CLAVE DE CAMPO | CLAVE LAFQA | β -glucosidasa mgPNP kg ⁻¹ h ⁻¹ | DesvEst | Deshidrogenasa mgINTF kg ⁻¹ h ⁻¹ | DesvEst | % Carbono Orgánico | DesvEst |
|-------------------------|-------------|--|---------|---|---------|-----------------------|---------|
| SF 5-M | 027-04 | 428.610 | 232.45 | 79.601 | 3.08 | 3.61 | - |
| SF 2-M | 025-04 | 5073.161 | 586.33 | 99.619 | 21.60 | 4.24 | - |
| SF 4-M | 026-04 | 1335.30 | 238.88 | 62.231 | 2.53 | 4.21 | - |
| SF 36-M | 029-04 | 993.645 | 521.13 | 53.102 | 4.60 | 3.39 | - |
| SF 39-M | 032-04 | 914.19 | 383.03 | 96.760 | 5.15 | 2.55 | - |
| SF 38-M | 031-04 | 3028.827 | 630.63 | 121.246 | 10.80 | 4.11 | - |
| SF 35-M | 028-04 | 3734.566 | 273.02 | 91.950 | 10.81 | 3.19 | - |
| SF 37-M | 030-04 | 2408.377 | 470.79 | 48.438 | 8.11 | 3.94 | - |
| Promedio general | | 2239.61 | 1617.83 | 81.62 | 25.42 | 3.65 | 0.59 |

Tabla A.2.3– Resultados de los indicadores biológicos en los ocho sitios de pastizales.

| CLAVE DE CAMPO | CLAVE LAFQA | β -glucosidasa mgPNP kg ⁻¹ h ⁻¹ | DesvEst | Deshidrogenasa mgINTF kg ⁻¹ h ⁻¹ | DesvEst | % Carbono Orgánico | DesvEst |
|-------------------------|-------------|--|---------|---|---------|--------------------|---------|
| SF 3-P | 042-04 | 2610.64 | 1066.60 | 109.079 | 16.33 | 4.39 | - |
| SF 6-P | 045-04 | 3966.409 | 394.73 | 91.998 | 20.56 | 4.84 | - |
| SF 8-P | 047-04 | 5597.144 | 933.56 | 104.131 | 14.59 | 5.71 | - |
| SF 7-P | 046-04 | 5465.207 | 697.08 | 116.986 | 25.27 | 6.37 | - |
| SF 1-P | 041-04 | 6871.886 | 977.47 | 116.240 | 17.69 | 6.52 | - |
| SF 4-P | 043-04 | 6474.534 | 784.39 | 146.099 | 28.63 | 9.02 | - |
| SF 5-P | 044-04 | 6545.86 | 755.24 | 171.518 | 10.78 | 4.81 | - |
| SF 10-P | 048-04 | 1708.20 | 655.24 | 80.556 | 6.47 | 4.83 | - |
| Promedio general | | 4904.99 | 1933.98 | 117.08 | 29.28 | 5.81 | 1.51 |

Tabla A.2.4– Resultados de los indicadores biológicos en los ocho sitios de acahuales.

| CLAVE DE CAMPO | CLAVE LAFQA | β -glucosidasa mgPNP kg ⁻¹ h ⁻¹ | DesvEst | Deshidrogenasa mgINTF kg ⁻¹ h ⁻¹ | DesvEst | % Carbono Orgánico | DesvEst |
|-------------------------|-------------|--|---------|---|---------|--------------------|---------|
| SF 13-A | 034-04 | 1121.06 | 127.99 | 102.886 | 5.73 | 6.63 | - |
| SF 17-A | 038-04 | 1646.95 | 1096.45 | 121.235 | 17.57 | 4.94 | - |
| SF 11-A | 033-04 | 4083.745 | 270.02 | 119.079 | 18.25 | 4.01 | - |
| SF 16-A | 037-04 | 5886.106 | 199.32 | 115.896 | 36.84 | 6.00 | - |
| SF 14-A | 035-04 | 8380.061 | 1359.39 | 102.655 | 3.73 | 4.72 | - |
| SF 20-A | 040-04 | 4400.365 | 326.19 | 123.792 | 12.45 | 4.29 | - |
| SF 15-A | 036-04 | 1920.91 | 642.81 | 84.823 | 11.80 | 5.44 | - |
| SF 19-A | 039-04 | 6061.127 | 1475.13 | 219.043 | 33.14 | 5.50 | - |
| Promedio general | | 4187.54 | 2536.15 | 123.68 | 40.65 | 5.15 | 0.94 |

ANEXO 3 - Resultados de los análisis en los indicadores físicos del suelo en el Ejido San Fernando.

Tabla A.3.1– Resultados de los indicadores físicos de ocho sitios de selva.

| CLAVE DE CAMPO | CLAVE LAFQA | textura | % Arcillas | DesvEst | Densidad Aparente g cm ⁻³ | DesvEst | Densidad Real g cm ⁻³ | DesvEst | % Porosidad | DesvEst |
|-------------------------|-------------|------------------|------------|---------|--------------------------------------|---------|----------------------------------|---------|-------------|---------|
| SF 9-S | 053-04 | Franco Arenosa | 15.79 | - | 0.49 | 0.10 | 2.45 | - | 80.18 | - |
| SF 4-S | 056-04 | Arcilloso | 63.16 | - | 0.46 | 0.11 | 2.27 | - | 80.16 | - |
| SF 7-S | 052-04 | Arcilloso | 63.16 | - | 0.58 | 0.11 | 2.34 | - | 75.62 | - |
| SF 2-S | 055-04 | Arcilloso | 63.16 | - | 0.47 | 0.08 | 2.09 | - | 78.03 | - |
| SF 6-S | 051-04 | Franco Arcillosa | 31.58 | - | 0.48 | 0.09 | 2.35 | - | 80.96 | - |
| SF 10-S | 054-04 | Arcilloso | 52.63 | - | 0.43 | 0.09 | 2.51 | - | 82.30 | - |
| SF 5-S | 050-04 | Franco | 13.16 | - | 0.45 | 0.13 | 2.22 | - | 79.77 | - |
| SF 1-S | 049-04 | Arcilloso | 68.42 | - | 0.38 | 0.03 | 2.12 | - | 82.69 | - |
| Promedio general | | | 46.38 | 22.77 | 0.47 | 0.06 | 2.29 | 0.15 | 79.96 | 2.28 |

Tabla A.3.2– Resultados de los indicadores físicos en los ocho sitios de maizales.

| CLAVE DE CAMPO | CLAVE LAFQA | textura | % Arcillas | DesvEst | Densidad Aparente g cm ⁻³ | DesvEst | Densidad Real g cm ⁻³ | DesvEst | % Porosidad | DesvEst |
|-------------------------|-------------|------------------|------------|---------|--------------------------------------|---------|----------------------------------|---------|-------------|---------|
| SF 5-M | 027-04 | Arcilloso | 47.37 | - | 0.71 | 0.09 | 2.16 | - | 93.70 | - |
| SF 2-M | 025-04 | Franco Arcilloso | 36.84 | - | 0.64 | 0.08 | 2.18 | - | 70.92 | - |
| SF 4-M | 026-04 | Franco Arcilloso | 39.47 | - | 0.76 | 0.11 | 2.13 | - | 64.01 | - |
| SF 36-M | 029-04 | Arcilloso | 63.16 | - | 0.90 | 0.10 | 2.63 | - | 65.87 | - |
| SF 39-M | 032-04 | Franco limosa | 5.26 | - | 0.89 | 0.07 | 2.62 | - | 66.08 | - |
| SF 38-M | 031-04 | Arcilloso | 42.11 | - | 0.88 | 0.19 | 2.64 | - | 66.21 | - |
| SF 35-M | 028-04 | Arcilloso | 57.89 | - | 0.93 | 0.11 | 2.74 | - | 65.92 | - |
| SF 37-M | 030-04 | Arcilloso | 68.42 | - | 0.87 | 0.08 | 2.68 | - | 68.53 | - |
| Promedio general | | | 45.07 | 19.77 | 0.82 | 0.11 | 2.47 | 0.26 | 70.15 | 9.74 |

Tabla A.3.3– Resultados de los indicadores físicos en los ocho sitios de pastizales.

| CLAVE DE CAMPO | CLAVE LAFQA | Textura | % Arcillas | | Densidad Aparente g cm ⁻³ | DesvEst | Densidad Real g cm ⁻³) | | % Porosidad | |
|-------------------------|-------------|------------------------|------------|-------|--------------------------------------|---------|------------------------------------|------|-------------|------|
| SF 3-P | 042-04 | Franco Arcillo Arenosa | 57.89 | - | 0.79 | 0.13 | 2.32 | - | 66.92 | - |
| SF 6-P | 045-04 | Arcilloso | 52.63 | - | 0.87 | 0.11 | 2.73 | - | 68.49 | - |
| SF 8-P | 047-04 | Arcilloso | 63.16 | - | 0.72 | 0.21 | 2.42 | - | 70.93 | - |
| SF 7-P | 046-04 | Arcilloso | 57.89 | - | 0.73 | 0.21 | 2.40 | - | 70.11 | - |
| SF 1-P | 041-04 | Arcilloso | 68.42 | - | 0.68 | 0.09 | 2.37 | - | 71.36 | - |
| SF 4-P | 043-04 | Arcilloso | 63.16 | - | 0.60 | 0.22 | 2.18 | - | 69.44 | - |
| SF 5-P | 044-04 | Arcilloso | 26.32 | - | 0.80 | 0.10 | 2.32 | - | 65.66 | - |
| SF 10-P | 048-04 | Arcilloso | 57.89 | - | 0.72 | 0.10 | 2.47 | - | 71.00 | - |
| Promedio general | | | 55.92 | 12.87 | 0.74 | 0.08 | 2.40 | 0.16 | 69.24 | 2.07 |

Tabla A.3.4– Resultados de los indicadores físicos en los ocho sitios de acahuales.

| CLAVE DE CAMPO | CLAVE LAFQA | Textura | % Arcillas | | Densidad Aparente g cm ⁻³ | DesvEst | Densidad Real g cm ⁻³ | | % Porosidad | |
|-------------------------|-------------|------------------|------------|-------|--------------------------------------|---------|----------------------------------|------|-------------|------|
| SF 13-A | 034-04 | Arcilloso | 52.63 | - | 0.66 | 0.10 | 2.36 | - | 73.04 | - |
| SF 17-A | 038-04 | Arcilloso | 50.50 | - | 0.86 | 0.08 | 2.64 | - | 68.01 | - |
| SF 11-A | 033-04 | Franco Arcilloso | 30.50 | - | 0.89 | 0.10 | 2.53 | - | 64.81 | - |
| SF 16-A | 037-04 | Arcilloso | 65.00 | - | 0.69 | 0.09 | 2.39 | - | 71.44 | - |
| SF 14-A | 035-04 | Arcilloso | 72.09 | - | 0.74 | 0.10 | 2.53 | - | 70.87 | - |
| SF 20-A | 040-04 | Franco | 20.50 | - | 0.73 | 0.17 | 2.63 | - | 72.49 | - |
| SF 15-A | 036-04 | Arcilloso | 65.50 | - | 0.71 | 0.10 | 2.43 | - | 71.87 | - |
| SF 19-A | 039-04 | Franco | 20.50 | - | 0.48 | 0.10 | 2.36 | - | 80.84 | - |
| Promedio general | | | 47.15 | 20.76 | 0.72 | 0.13 | 2.48 | 0.12 | 71.67 | 4.60 |

ANEXO 4 – Resultados de los análisis en los indicadores químicos por sitio de muestreo.

Tabla A.4.1– Resultados de los indicadores químicos en los ocho sitios de selvas.

| CLAVE DE CAMPO | CLAVE LAFQA | pH | DPR | CE $\mu\text{S cm}^{-1}$ | DPR |
|-------------------------|-------------|------|-------|--------------------------|--------|
| SF 9-S | 053-04 | 5.18 | 0.00 | 139.90 | 3.57 |
| SF 4-S | 056-04 | 4.67 | 1.71 | 62.45 | -5.60 |
| SF 7-S | 052-04 | 4.86 | -1.03 | 100.40 | -12.15 |
| SF 2-S | 055-04 | 4.38 | 0.00 | 116.10 | 8.79 |
| SF 6-S | 051-04 | 5.37 | 0.56 | 93.40 | -32.55 |
| SF 10-S | 054-04 | 5.15 | 1.17 | 81.35 | -26.43 |
| SF 5-S | 050-04 | 5.86 | -0.34 | 108.95 | -1.01 |
| SF 1-S | 049-04 | 4.27 | 0.47 | 106.20 | -11.68 |
| Promedio general | | 4.97 | 0.53 | 101.09 | 23.18 |

Tabla A.4.1– Resultados de los indicadores químicos en los ocho sitios de maizales.

| CLAVE DE CAMPO | CLAVE LAFQA | pH | DPR | CE $\mu\text{S cm}^{-1}$ | DPR |
|-------------------------|-------------|------|-------|--------------------------|--------|
| SF 5-M | 027-04 | 5.60 | 0.18 | 37.90 | 15.30 |
| SF 2-M | 025-04 | 5.79 | -0.17 | 75.65 | -11.24 |
| SF 4-M | 026-04 | 5.55 | 0.18 | 31.30 | -23.00 |
| SF 36-M | 029-04 | 5.29 | 0.00 | 48.55 | -5.15 |
| SF 39-M | 032-04 | 5.22 | 0.00 | 40.05 | 9.74 |
| SF 38-M | 031-04 | 5.34 | 0.19 | 43.20 | 23.61 |
| SF 35-M | 028-04 | 5.25 | 0.19 | 62.75 | -39.68 |
| SF 37-M | 030-04 | 4.74 | -1.27 | 44.80 | 61.16 |
| Promedio general | | 5.34 | 0.31 | 48.03 | 14.44 |

Tabla A.4.1– Resultados de los indicadores químicos en los ocho sitios de pastizales..

| CLAVE DE CAMPO | CLAVE LAFQA | pH DPR | | CE $\mu\text{S cm}^{-1}$ DPR | |
|-------------------------|-------------|--------|-------|------------------------------|--------|
| | | pH | DPR | $\mu\text{S cm}^{-1}$ | DPR |
| SF 3-P | 042-04 | 4.86 | -1.03 | 74.35 | 26.50 |
| SF 6-P | 045-04 | 4.81 | 0.00 | 51.25 | 15.80 |
| SF 8-P | 047-04 | 4.88 | -0.21 | 63.95 | -30.18 |
| SF 7-P | 046-04 | 4.79 | 0.21 | 59.55 | -39.13 |
| SF 1-P | 041-04 | 4.71 | 0.00 | 41.30 | -27.60 |
| SF 4-P | 043-04 | 4.50 | 0.22 | 71.75 | -4.60 |
| SF 5-P | 044-04 | 5.52 | -0.72 | 44.15 | -1.13 |
| SF 10-P | 048-04 | 4.39 | -1.60 | 86.80 | 15.90 |
| Promedio general | | 4.80 | 0.34 | 61.64 | 15.74 |

Tabla A.4.1– Resultados de los indicadores químicos en los ocho sitios de acahuales.

| CLAVE DE CAMPO | CLAVE LAFQA | pH DPR | | CE $\mu\text{S cm}^{-1}$ DPR | |
|-------------------------|-------------|--------|-------|------------------------------|--------|
| | | pH | DPR | $\mu\text{S cm}^{-1}$ | DPR |
| SF 13-A | 034-04 | 5.04 | 0.40 | 45.55 | -5.05 |
| SF 17-A | 038-04 | 5.45 | 0.18 | 105.25 | 3.14 |
| SF 11-A | 033-04 | 5.17 | 0.39 | 74.05 | 2.57 |
| SF 16-A | 037-04 | 4.65 | 0.43 | 83.65 | 10.40 |
| SF 14-A | 035-04 | 4.98 | 0.00 | 77.25 | 1.68 |
| SF 20-A | 040-04 | 5.21 | -0.19 | 116.85 | -23.02 |
| SF 15-A | 036-04 | 4.71 | 0.21 | 82.25 | -4.01 |
| SF 19-A | 039-04 | 6.16 | 0.00 | 111.85 | -3.67 |
| Promedio general | | 5.17 | 0.48 | 87.09 | 23.47 |

ANEXO 5 – Pruebas de Tukey.

Se muestran las tablas correspondientes a las pruebas de Tukey. Las diferencias entre los usos de suelo son mostradas por la letra **a**. La ausencia de diferencias es denotada por un guión (-)

| Porcentaje de carbono orgánico | Selva | Maizal | Pastizal | Agroforestal |
|---------------------------------------|-------|--------|----------|--------------|
| Selva | - | | | |
| Maizal | a | - | | |
| Pastizal | - | a | - | |
| Agroforestal | - | - | - | - |

| β-glucosidasa | Selva | Maizal | Pastizal | Agroforestal |
|----------------------|-------|--------|----------|--------------|
| Selva | - | | | |
| Maizal | - | - | | |
| Pastizal | - | - | - | |
| Agroforestal | - | - | - | - |

| Deshidrogenasa | Selva | Maizal | Pastizal | Agroforestal |
|-----------------------|-------|--------|----------|--------------|
| Selva | - | | | |
| Maizal | - | - | | |
| Pastizal | - | - | - | |
| Agroforestal | - | - | - | - |

| Ph | Selva | Maizal | Pastizal | Agroforestal |
|--------------|-------|--------|----------|--------------|
| Selva | - | | | |
| Maizal | - | - | | |
| Pastizal | - | - | - | |
| Agroforestal | - | - | - | - |

| Conductividad eléctrica | Selva | Maizal | Pastizal | Agroforestal |
|--------------------------------|-------|--------|----------|--------------|
| Selva | - | | | |
| Maizal | a | - | | |
| Pastizal | a | - | - | |
| Agroforestal | - | a | - | - |

| Porcentaje de arcillas. | Selva | Maizal | Pastizal | Agroforestal |
|--------------------------------|-------|--------|----------|--------------|
| Selva | - | | | |
| Maizal | - | - | | |
| Pastizal | - | - | - | |
| Agroforestal | - | - | - | - |

| Porcentaje de limos | Selva | Maizal | Pastizal | Agroforestal |
|---------------------------------|-------|--------|----------|--------------|
| Selva | - | | | |
| Maizal | - | - | | |
| Pastizal | - | - | - | |
| Agroforestal | - | - | - | - |
| Porcentaje de arenas. | Selva | Maizal | Pastizal | Agroforestal |
| Selva | - | | | |
| Maizal | - | - | | |
| Pastizal | - | - | - | |
| Agroforestal | - | - | - | - |
| Densidad real. | Selva | Maizal | Pastizal | Agroforestal |
| Selva | - | | | |
| Maizal | - | - | | |
| Pastizal | - | - | - | |
| Agroforestal | - | - | - | - |
| Densidad aparente. | Selva | Maizal | Pastizal | Agroforestal |
| Selva | - | | | |
| Maizal | a | - | | |
| Pastizal | a | - | - | |
| Agroforestal | a | - | - | - |
| Porcentaje de porosidad. | Selva | Maizal | Pastizal | Agroforestal |
| Selva | - | | | |
| Maizal | a | - | | |
| Pastizal | a | - | - | |
| Agroforestal | a | - | - | - |