



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA

**Impacto de diferentes coberturas y usos de la  
tierra, en la calidad del suelo de una zona  
semiárida.**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**Bióloga**

PRESENTA:

Hernández González Denisse Esmeralda

Director de tesis: Dr. Daniel J. Muñoz Iniestra



Los Reyes Iztacala, Tlalnepantla, Edo. de México



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.

Pies, para que los quiero si tengo alas para volar.

Frida Kahlo

## DEDICATORIA

Con mucho cariño principalmente a mis padres Alfredo y Gregoria que me dieron la vida y han estado conmigo en todo momento. Gracias papá y mamá por darme una carrera para mi futuro y por creer en mí, aunque hemos pasado momentos difíciles siempre han estado apoyándome y brindándome todo su amor, por esto y más les agradezco de todo corazón por la confianza y libertad que me dieron para decidir mi camino.

Para ustedes y para mis hermanos Luis y Claudia; quienes con su ejemplo, apoyo y muestras de cariño, me han motivado para seguir adelante. Por darme la oportunidad de crecer al lado de ustedes y ser mejor día a día.

Para mí querida tía chispita, por haberme educado como su hija, quien me enseñó a ser responsable de mi vida y de mis cosas, me impulsaba a estudiar una carrera universitaria, aquella personita que me enseñó a ser una mujer de bien, a tener una profesión y a esforzarme por todo lo que quisiera conseguir en la vida, porque las cosas “se hacen bien o mejor no se hace nada”, porque ella estaría en primera fila celebrando el cierre de un ciclo, que es éste, a ella le dedico mi trabajo de tesis pues hoy he cerrado el ciclo y he cumplido mi promesa, “Chispita, ya terminé mi carrera y hoy me titulo”.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi tutor y guía de ésta tesis Dr. Daniel J. Muñoz Iniestra, por haberme brindado la oportunidad de trabajar con él, por haber tenido la paciencia necesaria para ayudarme, por transmitirme su conocimiento y por ser demasiado accesible en todo momento. Gracias por su confianza y apoyo incondicional. Lo quiero mucho.

Un agradecimiento muy especial al Dr. Héctor Octavio Godínez Álvarez, quien entrego importantes conocimientos para desarrollar este trabajo; por su grata colaboración y apoyo. Además de realizar críticas constructivas para una mejor calidad del trabajo.

Dr. Diodoro Granados Sánchez por haber revisado mi tesis, el seguimiento y la supervisión que le dio a este trabajo me permitió aprender mucho más.

Mtra. Mayra Mónica Hernández Moreno por su valiosa tutoría en el proceso de realización de esta tesis.

Mtra. Ana Lilia Muñoz Viveros gracias por la orientación y ayuda que me brindo para la realización de esta tesis.

A mis amigas de carrera, con quienes compartí tantos momentos de estudio y diversión Mariela, Eréndira, Less, Karen, Mary. Por su valiosa amistad, siempre estuvieron a mi lado para ayudarme, escucharme, aconsejarme y en muchas ocasiones guiarme ¡Las adoro!

A mis amigos de toda la vida Víctor, Rosa, Chío, Alan quienes han estado siempre conmigo apoyándome y entregándome las fuerzas necesarias para lograr este y los objetivos que me he propuesto.

A todas aquellas personas que día a día me motivaron y me dieron las fuerzas para salir adelante.

## CONTENIDO

<b>1 INTRODUCCION</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS</b>	<b>3</b>
2.1 Objetivo general	3
2.2 Objetivos particulares	3
<b>3 MARCO TEORICO</b>	<b>4</b>
<b>4 ANTECEDENTES</b>	<b>11</b>
<b>5 MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>15</b>
5.1 Área de estudio	<b>15</b>
5.2 Selección de sitios de muestreo	17
5.3 Muestreo y análisis de muestras	18
5.4 Cálculo de índices de calidad y análisis de datos	19
<b>6 RESULTADOS Y CONCLUSION</b>	<b>23</b>
6.1 Comportamiento de las propiedades del suelo en los diferentes sitios	23
6.2 Índices de calidad del suelo	33
<b>7 CONCLUSIONES</b>	<b>39</b>
<b>8 REFERENCIAS</b>	<b>40</b>
<b>9 ANEXO</b>	<b>47</b>

## 1. INTRODUCCIÓN

El suelo es uno de los primeros receptores del impacto provocado por el mal uso de territorio. De acuerdo con la información proveniente del Inventario Nacional Forestal (SEMARNAT, 2002), se sabe que cerca de la mitad del territorio nacional ha sido afectada severamente por las actividades humanas. La misma fuente señala que en el 29% del territorio se eliminó la vegetación primaria para la introducción de actividades agropecuarias. Esto también quiere decir que cerca del 30% de los suelos del país han sido afectados en su calidad original, algunos de ellos están totalmente degradados. El problema no es sólo el cambio de uso del suelo, sino el mal manejo que se hace de ellos debido a que casi nunca se toma en cuenta la morfología y propiedades intrínsecas del suelo. La mayoría de los suelos agrícolas de México han sido sobre-explotados o sub-utilizados, provocando con ello un fuerte deterioro (Muñoz, 2009).

El uso intensivo o mal manejo del suelo puede causar cambios en sus propiedades físicas, químicas y biológicas las cuales reducen su calidad, al afectar las funciones básicas y beneficios que el suelo ofrece a los seres humanos. A medida que la intensidad de uso del suelo se incrementa, decrece la cobertura vegetal así como la densidad de raíces asociada a dicha cobertura, afectando significativamente la cantidad y calidad del carbono orgánico del suelo, reduciendo con esto la calidad del suelo (Lal *et al.*, 1999).

El concepto de calidad de suelos, integra e interconecta los componentes y procesos biológicos, químicos y físicos de un suelo y los vincula a funciones específicas que el suelo desarrolla (George, 2006). La mayoría de los trabajos sobre la calidad del suelo, se han enfocado en la búsqueda de propiedades de los suelos que reflejen de mejor forma los cambios en su calidad, así como las diferentes formas de medición y aplicación de ellas como indicadores (Navarrete, 2011). La evaluación de la calidad del suelo es indispensable para determinar si un sistema de manejo es sustentable, a corto y largo plazo (Larson y Pierce, 1991). Los indicadores de calidad no son solo útiles para evaluar el estado o

condición del suelo, también pueden ayudar a determinar las formas y políticas del uso de la tierra. La necesidad de contar con mediciones de una gran cantidad de variables ha llevado a la generalización del desarrollo y uso de indicadores de calidad del suelo, que utilizan la información edáfica de manera conjunta con otras variables ambientales para definir las bases de una agricultura menos agresiva, sustentable y ecológicamente compatible (Karlen *et al.*, 2003). La calidad del suelo evalúa el uso de la tierra desde el punto de vista de cambios en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Norfleet *et al.*, 2003).

Un suelo con buena calidad es aquel que es lo suficientemente fuerte para mantener una buena estructura, mantener los cultivos en posición vertical, resistir la erosión y la compactación, así como permitir el crecimiento de raíces sin restricciones y favorecer la proliferación de la flora y fauna del suelo. También tiene una buena transmisión del fluido y características de almacenamiento que permiten tener las proporciones correctas de agua, nutrientes disueltos y aire, para el máximo rendimiento de los cultivos y la mínima degradación ambiental (Jaramillo, 2002).

Las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas están entre los sitios más afectados por la pérdida de la calidad del suelo, debido principalmente al cambio de uso del suelo. De acuerdo con SEMARNAT (2002), el 45% de los matorrales originales de las zonas secas, han sido substituidos por cobertura antrópica, mientras que la expansión ganadera es la principal causa de la alteración de las zonas secas y tropicales. Acosta (2007) encontró que para el Valle del Mezquital, las prácticas de manejo, el cambio de uso de suelo y el uso de aguas residuales, son factores que modifican la calidad del suelo. En este sentido resulta importante conocer el impacto que tienen diferentes coberturas vegetales y usos de la tierra sobre la calidad de los suelos en una en la localidad del Durazno, donde se practica una agricultura de riego con agua residual, esta localidad se ubicada en el Valle del Mezquital, región semiárida Estado de Hidalgo.



## **2. OBJETIVO**

### **2.1 Objetivo general**

Evaluar el efecto que tienen distintas coberturas o usos de la tierra, sobre la calidad del suelo en una localidad del Valle del Mezquital, región semiárida del Estado de Hidalgo.

### **2.2 Objetivos particulares**

- Cuantificar propiedades del suelo que determinan su calidad en distintas coberturas o usos de la tierra.
- Evaluar el grado de calidad del suelo en distintas coberturas o usos de la tierra, aplicando dos diferentes índices de calidad del suelo.
- Proponer algunas alternativas para recuperar los suelos que presente el índice de calidad más bajo.

### 3. MARCO TEÓRICO

El concepto de calidad de los suelos fue desarrollado en respuesta a la demanda pública de dar un mayor énfasis al manejo sustentable del suelo y para que la comunidad científica reconozca que el manejo del suelo puede mejorarse si se ve al suelo con un enfoque holístico e integrativo (Herrick, 2002).

Los términos calidad y salud del suelo se utilizan a menudo como sinónimo, según quien se refiera a ellos. Dada la importancia del tema, recientemente se han propuesto diferentes definiciones de calidad del suelo, como la utilidad del suelo para un propósito específico en una escala amplia de tiempo (Bautista, 2004). La definición de calidad del suelo incluye tres principios importantes: a) la productividad del suelo, que se refiere a la habilidad del mismo para promover la productividad del ecosistema o agroecosistemas, sin perder sus propiedades físicas, químicas y biológicas; b) la calidad medio ambiental, entendida como la capacidad de un suelo para atenuar los contaminantes ambientales, los patógenos y cualquier posibles daño hacia el exterior del sistema, incluyendo también los servicios ecosistémicos que ofrece (reservorio de carbono, mantenimiento de la biodiversidad, recarga de acuíferos, entre otros.); y c) la salud que se refiere a la capacidad de un suelo para producir alimentos sanos y nutritivos para los seres humanos y otros organismos (Astier, 2002). La Soil Science Society of America (1997), citado por Herrick (2000), definió la calidad del suelo como la capacidad de un tipo específico de suelo para funcionar, dentro de los límites de los ecosistemas naturales o artificiales, para sostener la productividad vegetal y animal, mantener o mejorar la calidad del agua y del aire y apoyar la salud y la vivienda.

El concepto de calidad del suelo incluye la evaluación de propiedades y procesos del suelo, de cómo se relacionan con la habilidad del suelo para funcionar efectivamente como un componente de un ecosistema saludable. El concepto, constituye un elemento de referencia común del funcionamiento del sistema edáfico y del ecosistema en su conjunto, a través del seguimiento de los cambios en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Schoenholtz *et al.*,

2000). La calidad de suelo ha sido propuesta como un indicador integrativo de calidad ambiental, seguridad alimentaria y viabilidad económica. Por tal razón, se manifiesta como un indicador ideal del manejo sustentable de la tierra (Herrick, 2000).

Este concepto integra e interconecta los componentes y procesos biológicos, químicos y físicos de un suelo con las funciones específicas que este desarrolla (USDA, 1999). Como las funciones del suelo son múltiples, su análisis debe realizarse dentro del marco de atributos que reflejen su capacidad de cumplir dichas funciones. Considerando la dinámica de los procesos que realizan los suelos, rara vez se observa una relación uno a uno entre una propiedad indicadora y una función, ya que cada función puede estar determinada por una serie de propiedades del suelo (Astier, 2002).

La evaluación de la calidad del suelo, es un proceso a través del cual los recursos edáficos son evaluados sobre la base de las funciones del suelo (aquello que el suelo realiza) y de los cambios en las funciones del suelo que surjan en respuesta a un estrés natural o introducido, o de una práctica de manejo. Karlen *et al.* (1997) establecen seis funciones edáficas vitales: 1) sostener la diversidad y productividad biológica; 2) almacenar, regular y distribuir el flujo de agua y solutos; 3) almacenar y posibilitar el ciclo de nutrientes y otros elementos dentro de los ecosistemas terrestres 4); filtrar y depurar; 5) permitir la recarga de acuíferos, inmovilizar y desintoxicar materiales orgánicos e inorgánicos y 6) satisfacer las necesidades básicas de la población humana.

Es importante enfatizar que las evaluaciones de la calidad del suelo deben tener en cuenta propiedades y procesos biológicos, químicos y físicos. Para la interpretación, las mediciones deben ser evaluadas con respecto a tendencias a largo plazo o a señales de sustentabilidad. Carter *et al.*, (1997) proponen una secuencia general de cómo evaluar la calidad del suelo: 1) definir las funciones del suelo en cuestión; 2) identificar procesos edáficos específicos asociados a esas funciones y 3) identificar propiedades indicadoras del suelo que sean

suficientemente sensibles como para detectar cambios en las funciones o procesos del suelo de interés.

Los indicadores son propiedades de un suelo como la textura o la profundidad, los procesos son una serie acciones en el suelo que producen un resultado o tienen una consecuencia, por ejemplo la infiltración y percolación del agua en el suelo, de lo cual dependen las reservas hídricas del suelo (Duniway *et al.*, 2010).

Un indicador es una variable que cuantifica, mide, resume o simplifica y comunica, en forma comprensible, información relevante haciendo que un fenómeno o condición de interés se haga perceptible (Cantú, 2007). En general, los indicadores hacen referencia a las características o propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos que pueden ser medidas cualitativa o cuantitativamente y que proveen información acerca de que tan adecuadamente un suelo funciona, de modo que los mejores indicadores serán aquellas propiedades que influyan significativamente sobre la capacidad del suelo para proveer su función (Delgado, 2010). Un indicador de calidad de suelos se concibe como una herramienta de medición que debe dar información sobre las propiedades, procesos y características.

Larson y Pierce (1991) hacen la analogía entre la medición de la salud y calidad de los suelos y un examen médico para los seres humanos. Los médicos hacen uso de indicadores básicos del funcionamiento del organismo: la temperatura, la presión sanguínea, el pulso y de algunos análisis. En contraste, en el caso de los suelos no se ha definido un grupo único de indicadores básicos de su salud, seleccionar un grupo sería difícil, ya que cada circunstancia ecosistémica o agroecosistémica responde a condiciones muy particulares como: tipos de suelos, problemas ambientales específicos, sistemas de manejo, escala de tiempo y espacio, y de enfoques de investigación (científico, productivo, conservacionista, ecologista, político, entre otros) (Astier, 2002).

Haberern (1992) propone que los indicadores primarios deben ser propiedades relacionadas directamente con las funciones esenciales de los suelos, como tasa de infiltración, compactación, cantidad de carbono orgánico y capacidad productiva, su grado de cobertura por pastizales y bioindicadores (presencia de lombrices de tierra, termitas). Otros, como el de Hartemik (1998) miden de manera directa la calidad de los suelos usando indicadores físicos y químicos, sin embargo este autor no explica los criterios para su elección.

Los indicadores deben ser consistentemente correlacionados con alguna función de los ecosistemas por ejemplo; la productividad de las plantas o la retención de los recursos del suelo y el agua o la conservación de la biodiversidad. Sin embargo, los indicadores también deben ser un reflejo de los cambios reales en el sistema, en lugar de los cambios que se supone que se derivan del manejo (Villareal *et al.* 2010).

La selección de los indicadores debe ser consistente con el estatus funcional de uno o más procesos críticos del ecosistema; por ejemplo aquellos relacionados a la estabilidad del suelo, la infiltración de agua en el suelo y la capacidad del ecosistema para recuperarse después de perturbación (Herrick, 2002). Bautista (1994) enfatiza que dentro de estos indicadores se deben de incluir necesariamente el contenido de materia orgánica, diversidad de organismos o la respiración microbiana.

Para evaluar la calidad física del suelo, se han empleado indicadores que están relacionados, por un lado con propiedades que reflejen cómo el suelo acepta, retiene y proporciona agua a las plantas y por otro lado, con las condiciones que limitan el crecimiento de las raíces, la emergencia de plántulas, la infiltración, el movimiento de agua dentro del perfil y promueven el intercambio óptimo de gases. Entre las propiedades químicas propuestas como indicadores, resaltan aquellas que inciden en la relación suelo-planta como: la calidad del agua, la capacidad amortiguadora del suelo y la disponibilidad de nutrimentos para las plantas. Los

indicadores que reflejan estándares de fertilidad (pH, materia orgánica, nitrógeno, fósforo y potasio) son importantes en términos de la producción de cultivos. La importancia de la evaluación de propiedades biológicas del suelo, se relaciona con la descomposición de la materia orgánica derivada de residuos vegetales y animales, así como el reciclaje de nutrientes contenidos en la misma. Tienen la ventaja de servir como señales tempranas de degradación o de la mejoría del suelo (Navarrete, 2011). En el Cuadro 1 se enlistan el conjunto de indicadores físicos, químicos y biológicos propuesto para monitorear los cambios que ocurren en el suelo (Doran y Parkin, 1994).

Cuadro 1. Conjunto de indicadores físicos, químicos y biológicos del suelo.

<b>Propiedad</b>	<b>Relación con la condición y función del suelo</b>	<b>Valores o unidades relevantes ecológicamente; comparaciones para evaluación</b>
<b>FÍSICAS</b>		
Textura	Retención y transporte de agua y compuestos químicos, erosión del suelo	% arena, limo y arcilla
Profundidad del suelo, suelo superficial y raíces	Estima la productividad potencial y la erosión	cm o m
Infiltración y densidad aparente Capacidad de retención de agua	Potencial de lavado; productividad y erosividad Relación con la retención de agua, transporte y erosividad, humedad aprovechable, textura y MO.	Minutos/2.5 cm de agua y $g/cm^3$ % ( $cm^3/cm^3$ ), cm de humedad aprovechable/30 cm; intensidad de precipitación.
<b>QUÍMICAS</b>		
Materia orgánica (N y C total)	Define la actividad química y biológica	kg de C o N $ha^{-1}$
pH	Define la actividad vegetal y microbiana	Comparación entre el límite superior e inferior para actividad vegetal y microbiana
Conductividad eléctrica	Define la actividad vegetal y microbiana	$dSm^{-1}$ ; comparación entre los límites superiores e inferiores para la actividades vegetal y animal

P,N y K extractables	Nutrientes disponibles para la planta, pérdida potencial de N; productividad e indicadores de calidad ambiental	Kg Ha <sup>-1</sup> niveles suficientes para el desarrollo de los cultivos
<b>BIOLÓGICAS</b>		
C y N de la biomasa microbiana	Potencial microbiano catalítico, y depósito para C y N, cambios tempranos en el manejo sobre MO	Kg de N o C ha <sup>-1</sup> relativo al C y N total o CO <sub>2</sub> producidos
Respiración , contenido de humedad y temperatura	Mide la actividad microbiana; estima la actividad de la biomasa	Kg de C ha <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> relativo a la actividad de la biomasa microbiana, pérdida de C contra entrada al reservorio total de C
N potencialmente mineralizable	Productividad del suelo y suministro potencial de N	Kg de N ha <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> relativo al contenido de C y N total

Por otra parte, la propuesta de índices aparece con bastante frecuencia en la literatura científica y varía según la percepción que tienen los diferentes autores en la identificación de índices relevantes. El uso de índices de calidad en lugar de sólo utilizar propiedades, es más útil porque el índice representa el efecto múltiple de propiedades del suelo dándole un peso específico a cada propiedad de acuerdo con la importancia que tenga en la calidad del suelo (Singh y Khera 2009).

Los índices de calidad del suelo permiten analizar la situación e identificar puntos críticos con respecto a la sostenibilidad del suelo como medio productivo o bien como recurso natural importante para la calidad de vida y manutención de la biodiversidad, permiten analizar los posibles impactos antes de una intervención y ayudar a determinar si el uso del recurso es sostenible. La evaluación de la calidad del suelo puede determinarse comparando la evolución de un sistema a través del tiempo (comparación longitudinal) u observar simultáneamente uno o más sistemas de manejo alternativo con una referencia (comparación transversal) (Villarreal *et al.* 2010).

Los enfoques para generar índices de calidad son variados, realizados a diferentes escalas y por lo tanto poseen diferentes grados de precisión. Algunos autores han propuesto ecuaciones aditivas o multiplicativas que combinan de diversas formas las funciones del suelo, ponderadas de acuerdo con el interés del investigador, otros aplicaron un enfoque de sistemas para generar funciones de valores estandarizadas y algunos más utilizaron procedimientos multivariados (Vergara *et al.* 2005).

En esencia, un índice de la calidad del suelo (*SQI* en inglés) es un valor numérico, comprendido entre 0 y 1. Interpretándose el 1 como la mejor calidad y salud de dicho suelo y 0 como la peor calidad (Delgado, 2010). También podría expresarse en porcentaje, entre 0 y 100%, que valora la calidad de un determinado suelo para cumplir sus funciones en el ecosistema (Vergara *et al.* 2005).



#### 4. ANTECEDENTES

Andrews *et al.*, en 2002 examinaron la eficacia relativa de varios índices de calidad de suelo, utilizando métodos de evaluación en sistemas de producción en el norte de California. La eficacia de los índices fue probado por comparaciones de propiedades indicadoras, los autores concluyen que los índices son muy valiosos porque proporcionan la información necesaria para la selección de mejores prácticas de manejo de la tierra.

Aparicio y colaboradores en 2002, buscaron una herramienta de rápido y fácil manejo para realizar un monitoreo periódico de la calidad del suelo ante el avance de la agricultura continua en el sudeste Bonaerense. Se realizó, una serie de determinaciones físicas y químicas en tres establecimientos ubicados en los parajes de San José, San Manuel y Colinas Verdes. Entre las propiedades medidas se encuentra: conductividad hidráulica, resistencia mecánica con penetrómetro de cono, índice de estabilidad de estructura, densidad máxima, curva de característica de humedad, pH, CIC, materia orgánica, y % de sodio intercambiable. De los indicadores evaluados se encontraron algunas relaciones interesantes que permiten proponer como herramienta rápida y fácil de emplear para el monitoreo periódico de la condición de cada lote a la porosidad estructural del suelo.

Astier *et al.*, 2002, propusieron un marco para obtener indicadores de calidad de suelos que parte de 1) utilizar tres atributos ambientales de sustentabilidad, productividad, resiliencia y estabilidad, 2) caracterizar el sistema de manejo, en términos de escala espacial y temporal de análisis y 3) identificar los puntos críticos en el agroecosistema estudiado. Obteniendo un marco conciso y coherente para la medición de calidad de suelos sin generar largas listas de indicadores. Seleccionaron indicadores relacionados con los rendimientos de cultivos y ganado; para los atributos estabilidad y resiliencia. Se seleccionaron indicadores edáficos asociados con las propiedades biológicas, químicas y físicas y con la erosión de los suelos.

Shukla y colaboradores en 2005 identificaron los indicadores apropiados para evaluar la calidad de suelo a partir de un análisis factorial de cinco tratamientos: siembra directa de maíz (*Zea mays*) sin estiércol (NT), la siembra directa de maíz con estiércol (MNT), la siembra de maíz y soya (*Glycine max*) de rotación (NTR), maíz labranza convencional (CT) y pastos (M), en Coshocton, Ohio. Agruparon las propiedades del suelo para evaluar cinco factores, esto para la profundidad de 0-10cm: 1) Transmisión del agua, 2) Aireación del suelo, 3) Porosidad, 4) Textura y 5) Contenido de humedad. Encontrando que el factor 2 fue el más determinante. Para la profundidad de 10-20cm, evaluaron: 6) Agregación del suelo, 7) Conexión de poros del suelo, 8) Macroporos y 9) La producción de la planta. En esta profundidad el factor 6 fue el más relevante y recomienda que siempre se debe considerar para monitorear la calidad de suelo.

George en 2006, identificó variables físicas, químicas y especies claves del suelo en veinticuatro fincas de café orgánico y convencional bajo sombra diversificada y en tres fincas de café en pleno sol y en tres bosques, que podrían ser usadas como indicadores de la calidad de los suelos de los cafetales de Turrialba. Las variables comparadas fueron: población de nemátodos, lombrices de tierra, densidad aparente del suelo, textura, resistencia a la penetración, porcentaje de humedad, conductividad eléctrica, pH, materia orgánica, N,P,K, Ca, Mg, Cu, Zn, Mn y Fe. Se calculó un índice de calidad de suelo aditivo (ICSA) para comparar la calidad de los suelos bajo los diferentes sistemas de manejo, usando la producción biológica con el objeto principal la calidad del suelo. Se encontraron diferencias significativas entre tratamientos y entre el manejo orgánico y convencional.

Martínez en 2006, desarrolló un modelo, en una zona montañosa dedicada al cultivo de papa en Cundinamarca (Colombia), que permitió evaluar la calidad de las tierras. El modelo se basa en un análisis espacial, integra indicadores de calidad de las tierras con tecnologías como los sistemas de información geográfica, las imágenes de satélite, las bases de datos y de conocimiento, con el fin de apoyar la toma de decisiones sobre el uso, manejo y conservación de las

tierras. Se encontró que la erosión es uno de los procesos que tiene mayor efecto en la calidad de las tierras; también se evaluaron otros indicadores como la disponibilidad de agua, las condiciones de enraizamiento, las condiciones para la mecanización y el drenaje. El enfoque del modelo permite que sea adaptado para evaluación de la calidad de las tierras en otras zonas y para otros tipos de uso.

Ospina y colaboradores en 2006, evaluaron el efecto de dos sistemas de labranza y rotaciones de cultivos sobre la calidad física del suelo. Las evaluaciones se realizaron en un suelo Fluventic haplustept de Turén, Estado Portuguesa. Las variables indicadores fueron macroporosidad, proporción de macroagregados estables al humedecimiento, carbono orgánico total, biomasa aérea del cultivo de maíz al momento de realizar el muestreo, cantidad de residuos en superficie y capacidad de agua disponible. Los sistemas de labranza fueron, labranza convencional y siembra directa, y las rotaciones incluían los cultivos de maíz-algodón y maíz-frijol. Los resultados mostraron una mejor calidad en los suelos bajo siembra directa con rotación maíz-algodón, debido a un incremento en la estabilidad estructural y una mayor protección frente al clima.

Cantú y colaboradores en 2007, desarrollaron y aplicaron un set mínimo de indicadores del estado del suelo para evaluar su calidad en agroecosistemas con Molisoles de bajo a moderado desarrollo. La metodología se probó en una unidad ambiental homogénea, con Hapludoles típicos, bajo diferentes sistemas de uso y manejo, en una cuenca montañosa de la provincia de Córdoba. De la experiencia adquirida en esta investigación advierten los indicadores de la calidad del suelo no son universales sino que deben ser elegidos en función del tipo de ambiente y suelo de la región de estudio.

Rodríguez *et al.*, en 2009, evaluaron el impacto de los principales usos de la tierra en el “Cebollal” Planicie de Coro sobre algunas variables físicas, químicas, biológicas e hídricas del suelo. Tres usos de la tierra fueron evaluados; el bosque natural fue empleado como referencia para la construcción del gradiente ambiental (TUT-B), plantación de sábila *Aloe vera* bajo riego para la producción de gel con fertilización orgánica (TUR-Z) y un sistema melón (*Cucumis melo*) con

fertilización química y branza convencional (TUT-M). Se tomaron muestras de suelo a las profundidades de 0-10 y de 10-20cm. Encontraron que el TUT-Z y TUT-B tuvieron un comportamiento similar, presentando igual calidad de suelo, producto de mejores condiciones de fertilidad, como consecuencia de incrementos en la materia orgánica y la actividad biológica, el TUT-M presentó un desmejoramiento de la calidad del suelo al mostrar incrementos en los valores conductividad eléctrica y densidad aparente.

Campitelli y colaboradores en 2010, determinaron los indicadores que mejor representan la calidad de un suelo del área central de la provincia de Córdoba. Evaluaron seis tratamientos, seleccionando tres sitios de ensayo. En los que se determino contenido de carbono orgánico, nitrógeno total, pH, conductividad eléctrica, fosforo extractable, carbono liviano, carbono de ácidos húmicos y carbono de ácidos fúlvicos, densidad aparente, cambio en el diámetro medio ponderado de agregados, espesor del horizonte superficial y profundidad de  $\text{CaCO}_3$ . Encontrando que los indicadores más sensibles y sencillos de medir para evaluar calidad de suelos están relacionados a la fertilidad de los mismos: materia orgánica, nitrógeno total, fósforo, susceptibilidad a la erosión, profundidad de los  $\text{Ca CO}_3$  y espesor.

## 5. MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1 Área de estudio

La comunidad de El Durazno se encuentra dentro de la región denominada Valle del Mezquital, la cual representa una de las principales regiones geográficas del estado de Hidalgo, en el municipio de Ixmiquilpan (Figura 1).



Figura 1. Ubicación del área de estudio, localidad del Durazno Ixmiquilpan, Hgo.

El área se encuentra en una zona semi-árida y templada, formando parte de la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico y de la vertiente occidental de la Sierra Madre Oriental, rodeada por diversas elevaciones, que se funden hacia el oeste una extensa planicie moderadamente inclinada, donde se realiza la agricultura de riego. Hacia el lado oeste se encuentra una formación de diversas serranías, las cuales se encuentran dominando el lugar. El sitio de estudio se ubica en las faldas de la Sierra de Juárez, en el inicio de una planicie con lomeríos y algunas elevaciones aisladas (Jiménez, 1999).

La historia geológica del Valle del Mezquital, se remota hacia el Cretácico inferior, cuando las calizas marinas se plegaron de tal manera que las elevaciones correspondían a los anticlinales y las depresiones a los sinclinales, formándose así los primeros valles (Hernández, 2001). En el terciario sobrevino una gran actividad ígnea, la que se inició en el Mioceno con erupciones andesíticas y basálticas emanadas a través de grandes fracturas y grietas que permitieron el derrame de

lavas, lo que propició la formación de sierras y mesas, en las porciones de menor altitud se formaron varios lagos de extensión variable. En el Cuaternario se desencadenaron grandes procesos erosivos, mismos que rebajaron las elevaciones y rellenaron los lagos, dando lugar a la formación una gran planicie. (Segerstrom citado por Muñoz, 1999).

El tipo de clima es de tipo "BS0 hw" (W) (e) g, que corresponde a un semiseco estepario con temperaturas mayores a los 18°C, con el mes más seco en invierno y el más caliente antes del solsticio de verano. La temperatura media anual es de 18°C y su precipitación anual fluctúa entre los 400 y 450mm, con lluvias en verano. En los meses más calurosos se registran temperaturas hasta de 36°C y en los más fríos hasta -2°C (Vázquez, 2012).

Respecto a la hidrografía la región pertenece a la gran cuenca del Pánuco, a la subcuenca del río Moctezuma y a la cuenca alta del río Tula. En el área se encuentra una red hidráulica artificial construida para el Distrito de Riego, y algunos arroyos de funcionamiento intermitentes que en ocasiones llegan a formar pequeños riachuelos en la época de lluvia (Jiménez, 1999).

En cuanto a los suelos, Muñoz (1999) menciona que los suelos del lugar son jóvenes y poco desarrollados. Las unidades de suelo que identifica para la zona son: Feozem y Calcisoles, distribuidos sobre las planicies y derivados de sedimentos ígneas y calizas; Fluvisoles de textura variable asociados a ríos y antiguos lagos, Regosoles con texturas medias y gruesas ubicados en laderas, taludes y lomeríos. Litosoles restringidos a zonas de media y alta montaña en donde las pendientes son fuertes; Rendzinas localizadas sobre lomeríos y cerros calizos, son suelos oscuros y someros y Vertisoles cuya distribución se restringe a la porción sur del valle en las inmediaciones del Progreso y Mixquiahuala. El uso predominante del suelo es agrícola con sistema de riego con agua residual, también está presente el pastoreo de ganado ovino y caprino

Los tipos de vegetación que se presentan tienen correspondencia con la vegetación del Desierto Chihuahuense. De acuerdo con González-Quintero (1986)

el Valle del Mezquital, presenta muchos tipos de vegetación todos ellos con gran riqueza florística. La vegetación natural sólo se presenta a manera de parches discontinuos, integrada por matorrales espinosos, crasicuales que se desarrollan sobre laderas riolíticas con suelos delgados y muy pedregosos, además se presenta vegetación halófito (Muñoz, 1999).

## 5.2 Selección de sitios de muestreo

Para seleccionar y ubicar los sitios de muestreo se utilizaron mapas topográficos, e imágenes de satélite (Google Earth, 2010), el sitio de muestreo es una unidad geomorfológica que corresponde a una planicie inclinada con algunos lomeríos ubicada en la localidad El Durazno, es un área homogénea en cuanto a clima, relieve, litología y tipo de suelo, se seleccionaron cinco diferentes coberturas, en la misma unidad. En junio de 2012, se realizó una salida al campo, para localizar los sitios previamente escogidos, cada sitio fue ubicado y georreferenciado (Cuadro 2). En la figura 2 se muestra la vista panorámica de cada uno de los sitios de muestreo.

Cuadro 2. Coberturas seleccionadas ubicadas en la localidad del “Durazno” municipio de Ixmiquilpan.

Sitio	Código	Latitud	Longitud	Altitud (metros)
Mezquital cerrado	MC	20°31'20.3"	99°13'7.1"	1721
Mezquital abierto con pasto halófito	MH	20°31'23.5"	99°13'8.5"	1717
Mezquital abierto con suelo desnudo	MA	20°31'22.1"	99°13'8.6"	1712
Parcela agrícola	A	20°31'22.7"	99°13'10.7"	1721
Pastizal inducido	P	20°31'23.7"	99°13'9.1"	1725

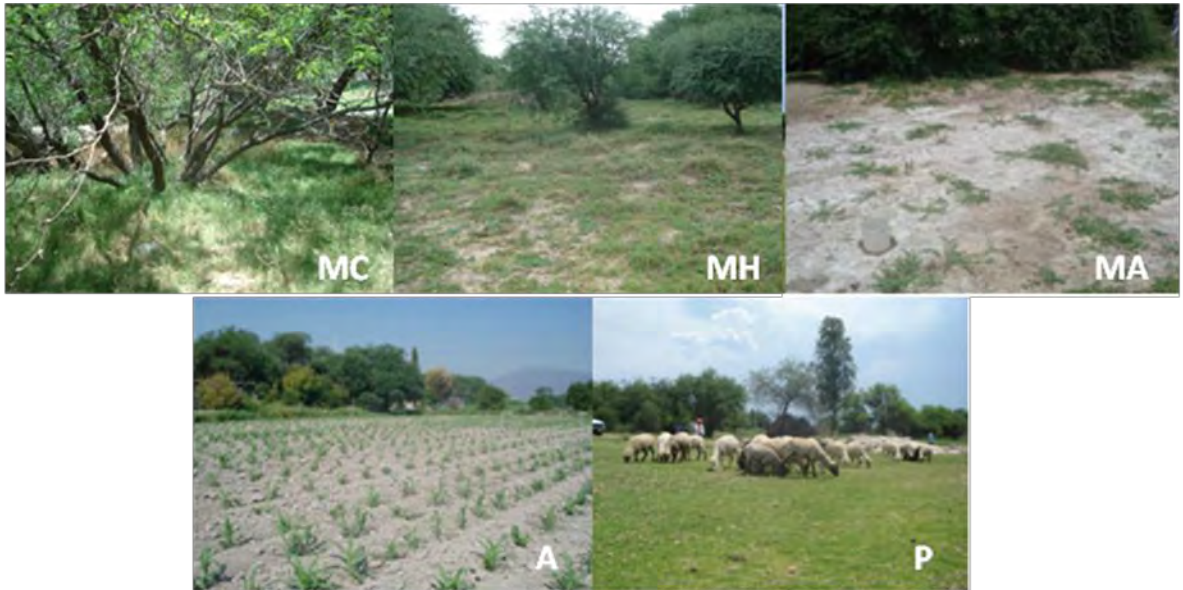


Figura 2. Vista panorámica de los sitios seleccionados Mezquital cerrado (MC), Mezquital abierto con pasto halófito (MH), Mezquital abierto (MA), Parcela agrícola (A) y Pastizal inducido (P).

### 5.3 Muestreo y Análisis de muestras

El muestreo se realizó con una barrena cilíndrica introduciéndola hasta una profundidad de 20cm, en cada sitio siguiendo una trayectoria en zig-zag se obtuvieron tres muestras (réplicas), mismas que se colocaron en bolsas de polietileno debidamente etiquetadas y se trasladaron al laboratorio para su análisis de acuerdo con Muñoz *et al.* (2013). Las propiedades que se evaluaron se presentan en el Cuadro 3.





Figura 3. Toma de muestras y datos de campo

Cuadro 3. Propiedades y técnicas analíticas analizadas en el laboratorio

PROPIEDADES FISICAS	TECNICA ANALITICA	PROPIEDADES QUIMICAS	TECNICA ANALITICA
Textura	Método de Bouyoucos.	Materia orgánica (MO)	Método de Walkley-Black.
Densidad aparente	Método volumétrico (Beaver, 1963).	pH	Con potenciómetro.
Densidad real	Método del picnómetro (Aguilera, 1980).	Capacidad de intercambio catiónico	Método volumétrico del Versenato.
Estabilidad de agregados	Método Yoder.	Calcio y magnesio intercambiables	Método volumétrico del Versenato (Cheng, 1951).
Capacidad de campo	Método gravimétrico (Ortiz y Ortiz, 1980).	Sodio y potasio intercambiables	Por flamometria (U.S.Salinity, 1954)
Conductividad eléctrica	Método USDA Salinity (1981)	Nitrógeno total	Método de Micro-Kjeldahl (Bremner, 1965).
Infiltración	Método de doble anillo.	Fósforo	Método de Olsen, (1965).

#### 5.4 Cálculo de índices de calidad y Análisis de datos

Los resultados se ordenaron en una base de datos y se obtuvieron los promedios, la desviación y el error estándar. Posteriormente se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de un factor, esto para conocer si existen diferencias significativas entre las propiedades del suelo evaluadas en los diferentes sitios. Para aquellas propiedades que presentaron diferencias significativas, se realizó la prueba de

comparación de medias de Tukey con el objeto de conocer con más detalle el comportamiento de las propiedades en los distintos sitios.

Posteriormente se calcularon los índices de calidad del suelo, utilizando los modelos de Cantú (2007) y Andrews *et al.*, (2002). De igual forma se aplicó otro ANOVA para demostrar si hay diferencias en el índice de calidad del suelo (ICS) y el tipo de cobertura o uso del terreno.

El primero modelo fue propuesto por Cantú (2007), el cual utiliza un número de indicadores mínimos, que se eligieron de acuerdo con las propiedades que presentaron diferencias significativas entre las coberturas o usos de suelo (Cuadro 4). De estas propiedades indicadoras se obtienen los valores máximos y mínimos

Cuadro 4. Indicadores de calidad de suelos, unidades de medida, valores máximos y mínimos definidos para los sitios evaluados.

Indicador	Unidad	I máx. Valor máximo	I min. Valor mínimo
MO	%	1	20
pH		5.5	7
Saturación de Bases	%	50	90
Estabilidad de agregados	%	20	80
Velocidad de infiltración	cm/ hr.	5	15
Densidad aparente	Mg m <sup>-3</sup>	0.8	1.2
Espesor del horizonte A	cm	20	40

Los valores fueron normalizados utilizando una escala 0-1 que representan, respectivamente la peor o mejor condición desde el punto de vista de la calidad, independientemente de los valores absolutos medidos para cada indicador. Para la normalización de las propiedades se pusieron dos situación posibles: la primera es cuando el valor máximo del indicador ( $I_{max}$ ) corresponde a la mejor situación de calidad de suelo (Valor normalizado del indicador  $V_n=1$ ) y el calculo es  $V_n = I_m - I_{min} / I_{max} - I_{min}$ . La otra situación es cuando el valor de  $I_{max}$  corresponde a la peor situación de calidad del suelo ( $V_n=0$ ) y se calcula como:  $V_n = 1 - (I_m - I_{min} / I_{max} - I_{min})$ . Donde  $V_n$ = valor normalizado,  $I_m$ = medida del indicador,  $I_{m\grave{a}x}$ = valor

máximo del indicador,  $I_{min}$ = valor mínimo del indicador. Finalmente se estableció un índice de calidad de suelos (ICS) promediando los valores de todos los indicadores. Para la interpretación del ICS se utilizó una escala de transformación en cinco clases de calidad de suelo propuesta por Cantú (2007) (Cuadro 5).

Cuadro 5. Clases de calidad de suelos

Índice de calidad del suelo	Escala	Clases
Muy alta calidad	0,80-1,00	1
Alta calidad	0,60-0,79	2
Moderada calidad	0,40-0,59	3
Baja calidad	0,20-0,39	4
Muy baja calidad	0,00-0,19	5

El segundo modelo es el que propone Andrews *et al.*, (2002) donde los valores de cada variable fueron transformados a una escala de 0-1. Las propiedades indicadores fueron agrupadas de forma ascendente de acuerdo al efecto del valor alto que una propiedad puede tener sobre la función del suelo. Si el efecto es considerado como bueno, entonces se agrupan las propiedades en “Mayor es mejor” por ejemplo, el aumento en el contenido de materia orgánica en la superficie del suelo, significa una elevación en el porcentaje de agua aprovechable y si el efecto fue considerado como malo, entonces se agrupan en “Menor es mejor” como la compactación, donde el suelo presenta una baja reserva hídrica, debido a la falta de un mayor espacio poroso que permita la movilidad del agua. Para los valores de las propiedades consideradas como “mayor es mejor”, cada observación fue dividida entre el valor más alto obtenido de tal manera que el valor del índice mas alto obtenido es 1. Las variables consideradas como “menor es mejor”, el valor más bajo obtenido (numerador) se divide entre cada observación (denominador) de tal modo que el valor más bajo recibió el puntaje de 1. En el Cuadro 6 se presentan las propiedades de los indicadores que fueron evaluados de acuerdo al efecto sobre la calidad del suelo; mayor es mejor, y menor es mejor.

Cuadro 6. Indicadores evaluados de acuerdo al efecto sobre el suelo mayor es mejor y menor es mejor.

Efecto sobre el suelo	Propiedad	Efecto sobre el suelo	Propiedad
Bueno: mayor es mejor	Materia orgánica Porosidad Nitrógeno Fosforo pH (entre 6 y 7.5) CICT	Malo: menor es mejor	Densidad aparente Compactación Acidez  Conductividad eléctrica (hasta 2 dSiems)

Por último se realizó un análisis de correlación para establecer el grado de asociación que hay entre las propiedades del suelo y el índice de calidad del suelo.

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1 Comportamiento de las propiedades del suelo en los diferentes sitios.

La calidad del suelo se evalúa a través del comportamiento y cambios en sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Karlent *et al.*, 1997), mismas que determinan procesos y funciones vitales del suelo. En el cuadro 7 se muestran los promedios para cada propiedad evaluada por sitio, así como el error estándar de la medición. De 20 propiedades consideradas, 11 presentaron diferencias significativas (Cuadro 8).

Cuadro 7. Valores promedio y error estándar de las propiedades físicas y químicas valoradas (a, b y c).

a)

Sitios	Arena %	Limo %	Arcilla %	D.A. Kg/m <sup>3</sup>	D. R. Kg/m <sup>3</sup>	Porosidad %	E. A %	C:C %
MC	44.67±2.67	29.33±0.66	26.00±2.00	1.20±0.09	2.28±0.63	50.35±0.91	26.98±1.38	39.71±0.41
MH	41.33±1.77	32.67±1.77	26.40±0.00	1.45±0.04	2.38±0.27	39.10±0.70	7.28±1.86	37.01±0.38
MA	41.00±2.49	34.00±1.44	25.00±1.44	1.59±0.05	2.60±0.13	38.70±0.78	5.95±1.54	33.22±1.13
A	35.00±1.15	30.00±0.66	33.00±0.66	1.16±0.04	3.35±0.40	65.37±0.40	57.93±0.40	47.80±2.27
P	54.00±1.15	20.33±0.33	25.67±1.45	0.99±0.05	2.03±0.33	51.25±2.73	61.66±1.72	66.18±3.75

MC= mezquital cerrado; MH= mezquital abierto-pastizal halófito; MA= mezquital abierto-suelo desnudo; A= parcela agrícola; P= pastizal; D.A. = densidad aparente; DR= densidad real; E.A.= estabilidad de agregados, C.C.= Capacidad de Campo

b)

Sitios	MO %	pH	C.E dSiems	C.I.C.T cmol/kg	Ca <sup>++</sup> cmol/kg	Mg <sup>++</sup> cmol/kg	Na <sup>+</sup> cmol/kg	K <sup>+</sup> cmol/kg
MC	1.38±0.18	9.44±0.06	13.05±0.29	27.67±1.44	8.47±0.05	2±0.58	5.80±1.15	7.19±1.34
MH	1.00±0.17	9.25±0.28	30.50±1.51	23.32±1.05	5.67±0.33	0.33±0.18	5.51±0.32	6.83±0.95
MA	0.44±0.13	9.36±0.29	12.55±2.12	22.79±0.73	6.47±0.29	2.33±1.21	3.23±0.28	6.41±0.98
A	2.39±0.35	8.57±0.03	2.65±0.56	25.05±0.88	9.00±0.58	3.67±0.67	2.14±0.15	6.00±0.35
P	16.73±0.68	8.03±0.17	2.8±0.97	25.25±0.96	8.46±0.07	2.2±0.83	1.89±0.19	5.21±0.76

MC= mezquital cerrado; MH= mezquital abierto-pastizal halófito; MA= mezquital abierto-suelo desnudo; A= parcela agrícola; P= pastizal. M.O. = materia orgánica; C.E. = conductividad eléctrica

c)

Sitios	K <sup>+</sup> cmol/kg	PSB %	Nitrógeno %	Fósforo ppm	Infiltración cm/hr	PSI %
MC	7.19±1.34	86.73±0.67	0.01±0.00	5.03±1.11	8.48±0.95	33.98±2.38
MH	6.83±0.95	80.27±0.56	0.06±0.02	2.93±1.15	1.94±0.56	47.52±1.76
MA	6.41±0.98	83.47±0.98	0.07±0.01	2.4±0.4	2.51±0.01	17.60±1.84
A	6±0.35	79.00±0.35	0.23±0.00	5.77±0.63	12.88±1.49	9.89±0.91
P	5.21±0.76	78.27±0.76	0.41±0.03	3.8±1.23	12.80±1.13	10.72±0.66

MC= mezquital cerrado; MH= mezquital abierto-pastizal halófito; MA= mezquital abierto-suelo desnudo; A= parcela agrícola; P= pastizal; PSB= porcentaje de saturación de bases; PSI = porcentaje de saturación de sodio

Cuadro 8. Resultados ANOVA de un factor para las propiedades evaluadas

Propiedad	F	P	Propiedad	F	P
Arenas	12.150	0.001*	CICT	10.759	0.001*
Limos	23.995	0.000*	Ca++	34.027	0.000*
Arcillas	7.489	0.005	Mg++	2.740	0.089
Densidad Aparente	1.000	0.452	Na+	1.660	0.235
Densidad Real	25.942	0.000*	K+	.736	0.588
Porosidad	3.179	0.063	%Sat. Bases	3.160	0.064
Estabilidad agregados	141.203	0.000*	% Sodio inter.	86.388	0.000*
Capacidad de campo	1.769	0.211	Nitrógeno	49.428	0.000*
pH	9.484	0.002*	Fósforo	1.639	0.240
MO	47.604	0.000*	Infiltración	35.365	0.000*

\*Diferencias significativas Alfa < 0.05

No obstante que el muestreo se realizó en un mismo tipo de suelo, se esperaría pocos cambios en la granulometría, sin embargo en el Cuadro 8, se observa que la arena y el limo presentan diferencias significativas entre los distintos sitios ( $p < 0.05$ ). De acuerdo a la prueba de Tukey en el suelo de la parcela agrícola (A) y el pastizal inducido (P) es donde se presentan las mayores diferencias, por otra parte los mezquiales muestran una menor variación entre sí. El pastizal (P) tiene el mayor porcentaje de arena y una clase textural franco arcillo arenosa, lo cual garantiza una buena aireación, adecuada permeabilidad y un drenaje moderado. En contraparte la parcela agrícola (A), fue la menos arenosa y la más arcillosa, teniendo una textura franco arcillosa, los distintos tipos de matorrales presentan una textura franca. El limo es más dominante en el mezquital halófito (MH) y mezquital abierto (MA). Las diferencias granulométricas puede ser explicadas por el efecto diferencial de la altura de cada sitio, la variación de la micro-topografía y el grado de protección que tiene el suelo (cobertura) factores que determinan la intensidad y dirección del escurrimiento superficial (Acín, 2012). El agua y el viento son los principales vectores que remueven las partículas del suelo, autores como Peters *et al.* (2006) y Castro, (1998) señalan que el movimiento de materiales en la superficie del suelo depende en gran medida del microrelieve del suelo y del patrón o arreglo que presenta la cobertura vegetal, habiendo más arrastre cuando la densidad de plantas es menor y una menor movilidad de partículas, a mayor densidad de la cobertura vegetal. Bajo este razonamiento se puede considerar

que la textura del suelo original o más conservado es la del pastizal, ya que es el sitio donde el suelo está protegido totalmente. Si se considera al pastizal como sitio de referencia, la parcela agrícola es la que presenta más cambios granulométricos, lo cual es atribuido muy probablemente al manejo que recibe. El cultivo intensivo causa cambios adversos de las propiedades físicas y reduce la calidad del suelo (Lal *et al.*, 1999), sin embargo para este caso particular esto no es necesariamente cierto, ya que la parcela agrícola (A), tiene una mezcla equilibrada de arena, limo y arcilla, lo que garantiza un equilibrio entre la permeabilidad y retención de agua y nutrientes (Porta *et al.*, 2003; Muñoz *et al.*, 2013).

La estabilidad de agregados es otra propiedad que muestra variación significativa en los distintos sitios. La prueba de Tukey indica que tanto el pastizal y la parcela agrícola presentan valores similares, pero difieren respecto del mezquital halófito y abierto los cuales son parecidos en los valores de estabilidad. Los sitios con una mejor estabilidad de agregados son el pastizal (P) y la parcela agrícola (A) (Figura 4), cuanto mayor sea el valor de agregados, menor será su riesgo ante la erosión (Castro, 1998). Otra función de los agregados es su relación con el almacenaje de agua y la actividad de la comunidad microbiana (Stadtmüller, 1994). De acuerdo con los resultados, el sitio con menor estabilidad de agregados fue el mezquital abierto (MA) con un 5%, esto propició que en este sitio se desarrollen costras físicas sobre la superficie; al respecto Tate (1995) menciona que la destrucción de los agregados es el primer paso hacia el desarrollo de costras y sellado superficial, los cuales impiden la infiltración del agua e incrementan la erosión. La estabilidad de agregados es una medida de la vulnerabilidad de los agregados del suelo frente a fuerzas externas destructivas (Hillel, 1982). Los agregados son importantes para el movimiento y almacenaje de agua del suelo, protegen contra la erosión, favorecen el desarrollo radicular y la actividad de la comunidad microbiana (Tate, 1995). Por otra parte, en su interior los agregados protegen a la materia orgánica contra el ataque microbiano. La formación y la preservación de agregados contribuyen a la preservación de la materia orgánica en el suelo

(USDA, 1999). La estabilidad de agregados del suelo, por ser una característica edáfica dinámica, es considerada un indicador sensible que muestra la tendencia a la recuperación o degradación de los suelos y se encuentra relacionada con el contenido orgánico y actividad microbiana, el laboreo del suelo, la secuencia y la frecuencia de cultivos en rotación (Gabioud, 2011).

La infiltración es otra de las propiedades que presenta diferencias entre los sitios (Cuadro 7c), exhibiendo un comportamiento muy similar a la estabilidad de los agregados. La parcela agrícola (A) y el pastizal (P) tienen valores similares más altos de infiltración, seguidos del mezquital cerrado, los sitios donde el suelo presenta la menor velocidad de infiltración son MA y MH (Cuadro 7c y figura 4). Estos resultados indican que los sitios A y P son los que más favorecen la entrada de agua al suelo, aumentando así las reservas hídricas. Del agua infiltrada se abastecen las plantas y muchos organismos, además el excedente de esta agua permite la recarga de acuíferos, por otra parte al infiltrarse más agua se reduce el riesgo de erosión debido a la disminución del escurrimiento superficial (Venialgo, 2001).

Los mezquiales abiertos son los sitios donde se infiltra menos agua en el suelo, esto se correlaciona con la baja estabilidad de agregados, menor porosidad y bajos contenidos de materia orgánica, además en estos sitios al presentar más superficie con suelo desnudo, las gotas de lluvia caen directamente al suelo y rompen los agregados en pequeñas partículas que pueden obstruir y tapar los poros superficiales, formando así un sellado o encostramiento de la superficie lo que impide la entrada del agua (Corinna y Herrick, 2010). Lo contrario ocurre con los sitios P y A, donde al tener una mejor porosidad a consecuencia de tener más materia orgánica y mejor estabilidad estructural la infiltración es favorecida.

La porosidad también tiene diferencias importantes (Cuadro 7a), la parcela agrícola destaca por ser el sitio con un suelo más poroso, esto se atribuye en parte a la textura franco arcillosa que tiene, le siguen el pastizal y el mezquital



cerrado con valores similares y por último los mezquiales halófito y abierto con suelo desnudo con las porosidades mucho más bajas. La porosidad de un suelo depende del tamaño de las partículas y del tipo de estructura que presente el suelo (Pacheco, 1970). Uno de los principales factores que mantienen o crean altos valores de porosidad en los suelos es la biota del suelo, la fauna del suelo, especialmente los individuos macroscópicos. Los gusanos, termitas y muchos otros tipos de fauna se mueven a través del suelo y, al hacerlo, dejan vías como bioporos (Dexter *et al.*, 2008). Sin embargo para que la edafofauna esté presente en el suelo es necesario que tenga suficiente alimento (materia orgánica), en este sentido, la elevada porosidad del suelo en los sitios A, P y Mc, está directamente asociada con los contenidos de materia orgánica de esos sitios (Cuadro 7b).

Como ya se mencionó, la parcela agrícola es el sitio donde el suelo es más poroso, Venialgo *et al.* (2001) mencionan que los suelos que se incorporan para uso en agricultura, sufren profundas modificaciones en las propiedades físicas; además que los residuos de la cosecha dejados sobre el suelo conducen a una alta agregación y porosidad del suelo, a un mayor número de macroporos, y por ende, facilitan la infiltración del agua de lluvia. Aunque procesos como la compactación ocasionada por el paso de la maquinaria agrícola, conduce a una modificación del volumen de poros del suelo que afecta, en mayor o menor medida el desarrollo de las plantas (Cerisola *et al.* 2005).

La densidad aparente (DA) es una propiedad muy relacionada con la porosidad, y aunque no presenta diferencias estadísticamente significativas, expresa una variación importante, los sitios MA y MH tienen densidades aparentes con valores muy altos, lo que indica que los suelos están muy compactos; en tanto que el suelo del pastizal fue el que tuvo el valor más bajo, lo que explica la alta porosidad que se presentan en este sitio. El comportamiento de esta propiedad está correlacionado con el contenidos de materia orgánica (Cuadro 7b), pues se sabe que la materia orgánica aligera los suelos al abrir el espacio poroso por el elevado volumen que genera (Porta *et al.*, 2008). Daddow y Warrington (1983)

determinaron que valores de densidad aparente de  $1.46 \text{ kg m}^{-3}$  constituyen el umbral crítico para el desarrollo radicular de gramíneas, en general, el proceso de germinación es más rápido y completo con densidades aparentes de  $1.2 \text{ kg m}^{-3}$  o menores (Treadghill,1982).

La compactación del suelo produce un aumento en su densidad (densidad aparente), aumenta su resistencia mecánica, destruye y debilita su estructuración. Todo esto hace disminuir la porosidad total. Los efectos que la compactación produce, se traducen en un menor desarrollo del sistema radical de las plantas y, por lo tanto, un menor desarrollo de la planta en su conjunto, lo que redundaría en una menor producción (Batey, 2009) Un incremento en las proporciones de arcilla y materia orgánica promueve la agregación, provocando una disminución de la densidad aparente (Meza y Geissert, 2003). Por otro lado, el espacio poroso tiende a disminuir con la profundidad, donde el suelo y la biota que se agregan son cada vez menos influyente (Schaetzl y Anderson, 2005).

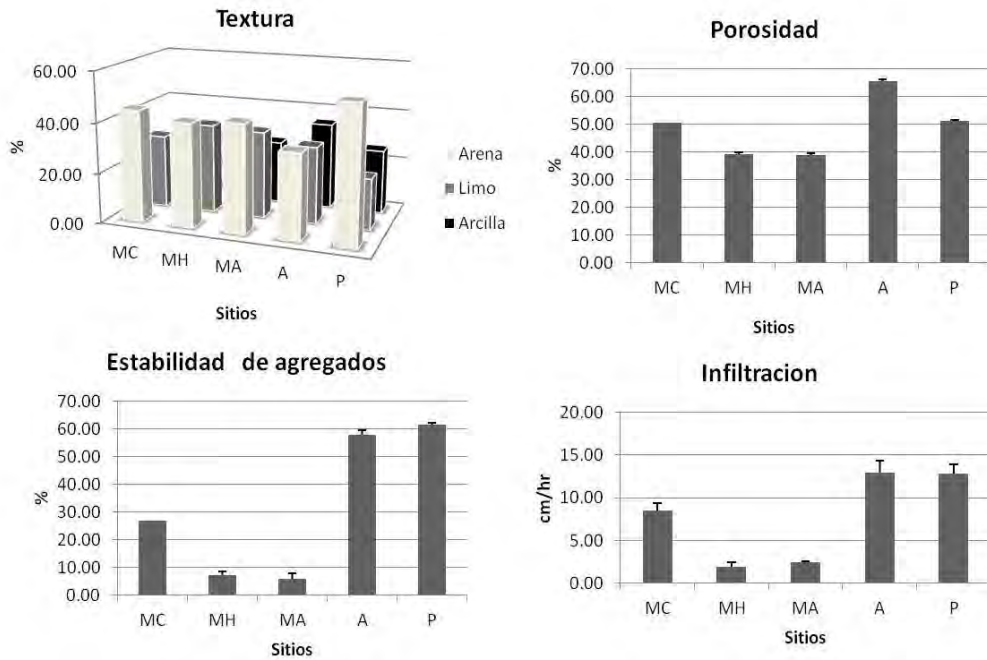


Figura 4 .Comportamiento de las propiedades físicas que tienen mayor relevancia en la calidad del suelo. (Promedio y error estándar). MC= mezquital cerrado; MH= mezquital abierto-pastizal halófito; MA= mezquital abierto-suelo desnudo; A= parcela agrícola; P= pastizal

La materia orgánica es otra de las propiedades del suelo que presentó importantes variaciones, el pastizal es el sitio que tiene los mayores contenidos con un 16.73% (Figura 5) entrando en la categoría de extremadamente rico. La riqueza de MO en pastizales ha sido ampliamente documentada, las gramíneas por su ciclo de vida corto y por su cobertura casi total, aportan grandes contenidos de materia orgánica año tras año (Campitelli *et. al*, 2010). Debido a que las raíces ocupan diferentes horizontes del suelo, mejoran la amplitud de absorción de los nutrimentos esenciales. La alta producción de raíces en los pastizales libera sustancias que estimulan a los microorganismos del suelo, además las raíces pueden absorber nutrimentos de las capas profundas del suelo, llevarlos a la superficie y hacerlos disponibles para la pastura. De los demás sitios evaluados, la parcela se encuentra en segundo lugar con un 2.39% de MO y en último lugar está el mezquital abierto con 0.44% entrando en la categoría de extremadamente pobre (Figura 5); esta falta de MO hace al suelo menos fértil; con poca capacidad de retención de agua, no permite que las raíces penetren profundamente y causa deficiencia de nutrientes (Porta *et al.*, 2003).

La materia orgánica es una de las propiedades más importantes para evaluar la calidad del suelo, ya que contribuye al crecimiento de las plantas a través de sus efectos sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. De ella dependen otras propiedades como la infiltración, la compactación, la porosidad, la estabilidad de los agregados, el intercambio iónico y la fertilidad del suelo (USDA, 1999; Boix-Fayos *et al.*, 2001; Dexter *et al.*, 2008)

Como se puede observar en el cuadro 8 y figura 5, el nitrógeno total también muestra diferencias significativas presentando un comportamiento similar al de la materia orgánica de la cual depende, el pastizal es la cobertura con mayor contenido de nitrógeno, seguido de la parcela agrícola, después los mezquiales abierto y halófito (MA y MH) y por último el mezquital cerrado con el contenido más bajo. Estos resultados indican que los sitios con vegetación natural presentan un menor contenido de nitrógeno total, lo cual es consecuencia de los pobres contenidos de materia orgánica y de la baja actividad microbiológica del suelo (Wezel y Herbrig, 2000), afectada también en gran medida por la elevada salinidad de estos sitios (Cuadro 7b y 7c). Contrariamente a lo que autores como Lal *et al.*, 1999, (Citado por Singh and Khera, 2009) mencionan, la parcela agrícola presenta un suelo más rico en nitrógeno que el de los sistemas naturales, cuando por lo regular es al revés, este comportamiento indica que se la parcela agrícola estudiada recibe un buena fertilización.

De igual modo el intercambio catiónico tiene diferencias significativas siendo más elevado en la parcela agrícola (Fig. 5), seguido del matorral abierto (MA) y el pastizal (P). El comportamiento de esta propiedad depende de la cantidad de arcilla y el contenido de humus, en este sentido la parcela agrícola presenta un elevada cantidad de arcilla (34.67%) y materia orgánica humificada. Dado que el suelo del pastizal es el que tiene los mayores contenidos de materia orgánica, se esperaría que tuviera un intercambio elevado, sin embargo no es así, Porta *et al.*, 2003 y Videla *et al.*, 2008, indican que para que la materia orgánica tenga un participación importante en la capacidad de intercambio catiónico del suelo, es

necesario que ésta se encuentre biotransformada en sustancias húmicas, de acuerdo a lo anterior consideramos que la materia orgánica del pastizal presenta un menor contenido húmico.

Por último la conductividad eléctrica (CE) también presenta una variación significativa en los distintos sitios. Los mezquiales en general son los que tienen los valores más altos de CE (Figura 5), lo que indica que son los sitios donde el suelo presenta un mayor contenido de sales, lo cual puede limitar el desarrollo normal de las plantas y afectar otras propiedades del suelo. El sitio con el valor más bajo de CE es la parcela agrícola, lo cual viene a corroborar que esta recibe un buen manejo. Por otra parte, al observar los valores de las bases y en especial de porcentaje de sodio intercambiable (Cuadro 7 b y c) es claro que la principal base que satura los complejos de intercambio es el sodio, por lo que se puede afirmar que el suelo de los mezquiales se puede considerar como un suelo salino sódico.

Los suelos con problemas de salinidad y/o sodicidad se presentan en zonas áridas o semiáridas donde la disponibilidad de agua es limitada y la meteorización del material parental produce suelos con acumulaciones de sales solubles en el perfil o con la dominancia de sodio intercambiable entre las bases de cambio (Castro, 1996).

Pérez (2011) menciona que estas sales aumentan la presión osmótica de la solución del suelo, restringiendo la posibilidad de succión del agua por las plantas, pudiendo impedir el abastecimiento de la misma. Si el contenido de sodio es elevado puede producirse un efecto de dispersión de las partículas arcillosas y de la materia orgánica, con la correspondiente pérdida de estructura del mismo e impermeabilización fomentando la compactación y encostramiento. La disminución de la conducción hidráulica y un deficiente crecimiento de la mayoría de las plantas.

Los suelos salino-sódicos se forman como resultado de los procesos de salinización y sodificación, contienen alta concentración de sales y de sodio intercambiable, por lo tanto su CE es mayor de 4 mmhos/cm y el pH menor de 8.5. (Casanova, 2005). El proceso de sodicidad puede darse por un lavado selectivo que elimina ciertas sales distintas al sodio, haciendo que se incremente la concentración de este ión, provocando con esto la elevación del pH y la floculación del suelo, afectando con esto el drenaje del suelo y dificultando las labores de labranza. La condición de este tipo de suelo plantea problemas como que las partículas de arcilla se dispersen con facilidad, lo que produce la obturación de los poros y hace que la permeabilidad y la aireación del suelo sean malas, además la excesiva proporción de sodio en la disolución del suelo produce desequilibrios nutritivos y/o toxicidad para las plantas, y que su crecimiento es muy pobre y el amarillamiento de sus hojas y su marchitez son notables (Castro, 1996). La salinidad y sodicidad se presentan también en las zonas agrícolas, tal es el caso del área estudiada donde se utilizan aguas residuales provenientes de la ciudad de México y área metropolitana de la Ciudad de México (Muñoz, 1999).

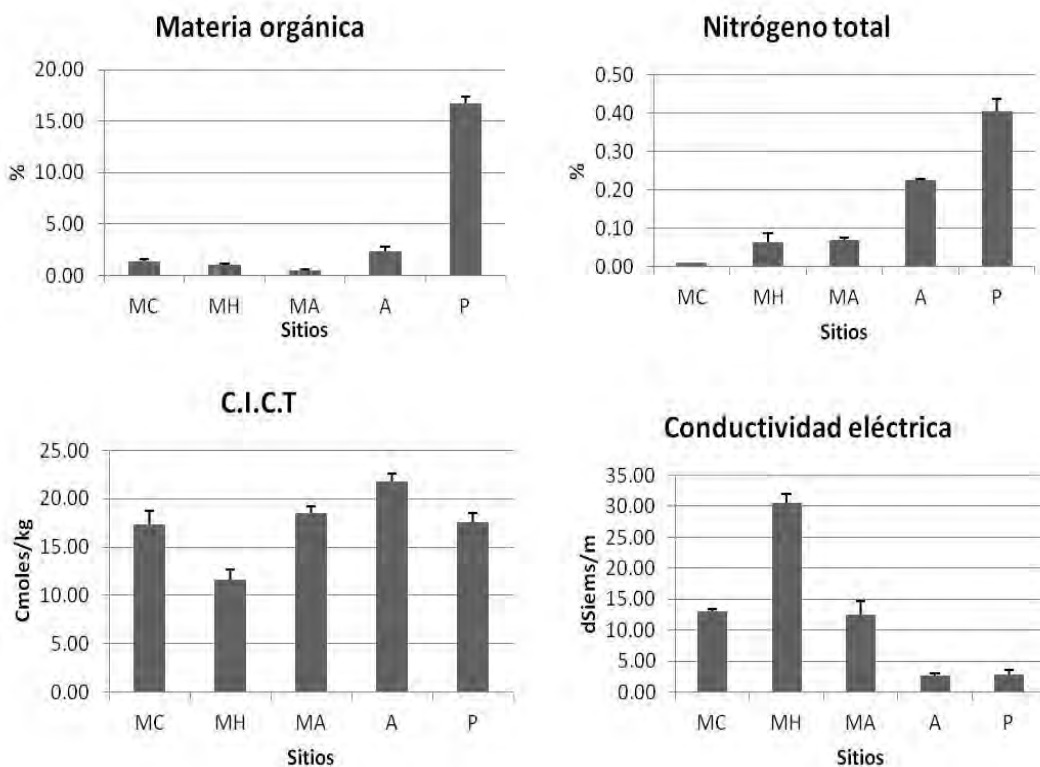


Figura 5. Variación de propiedades químicas importantes en la calidad del suelo en los diferentes sitios. (Promedio y error estándar). MC= mezquital cerrado; MH= mezquital abierto-pastizal halófito; MA= mezquital abierto-suelo desnudo; A= parcela agrícola; P= pastizal

## 6.2 Índices de calidad del suelo

Los resultados obtenidos en los dos modelos utilizados para evaluar la calidad del suelo (Cantú, 2007 y Andrews, 2002), se presentan en los cuadros 9 y 10, donde se muestran los valores normalizados de cada propiedad indicadora utilizada y el índice de calidad correspondiente para cada sitio. Para la interpretación del ICS se utilizó una escala de transformación en cinco clases de calidad del suelo (Cuadro 5).

Cuadro 9. Valores normalizados por cada indicador e índices de calidad de suelo obtenidos de la ecuación de Cantú (2007) para los suelos de los distintos sitios.

	Índice de Calidad (Cantú, 2007)				
	MC	MH	MA	A	P
MO	0.06	0.03	0.00	0.12	1.00
pH	0.00	0.13	0.06	0.62	1.00
SB	1.00	0.24	1.07	0.09	0.00
EA	0.38	0.02	0.10	0.93	1.00
Infiltración	0.60	0.00	0.20	1.00	0.99
Espesor	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
CICT	1.00	0.11	0.00	0.46	0.51
CE	0.63	0.00	0.65	1.01	1.00
PSI	0.36	0.00	0.81	1.00	0.98
Nitrógeno	0	0.13	0.15	0.55	1.00
<b>IC</b>	<b>0.50</b>	<b>0.17</b>	<b>0.40</b>	<b>0.68</b>	<b>0.85</b>

MC=Mezquital cerrado, MH=Mezquital halófito, MA= Mezquital abierto, A= Parcela agrícola, P= Pastizal. SB = Saturación de Bases, EA =Estabilidad de agregados, CICT = Capacidad de intercambio catiónico total, CE = Conductividad Eléctrica, PSI = Porcentaje de Sodio intercambiable.

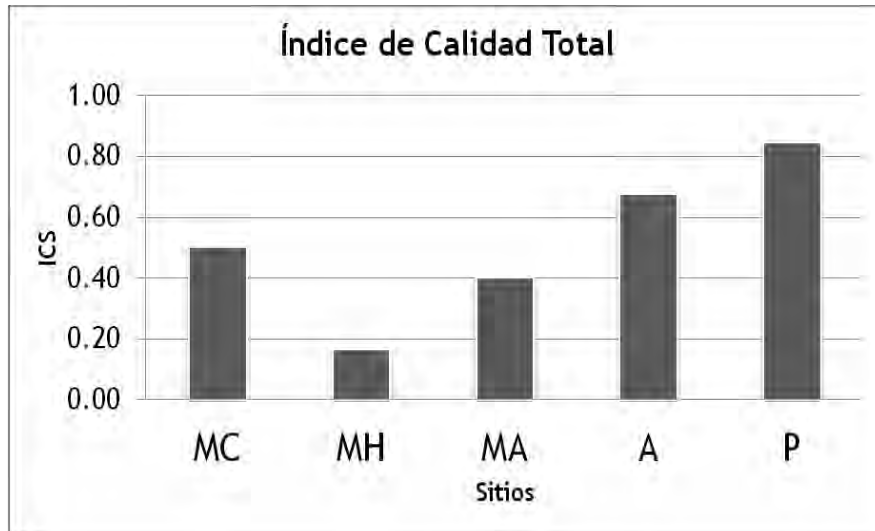


Figura 6. Índice de calidad del suelo en los diferentes sitios de acuerdo a Cantú (2007).

Cuadro 10. Valores normalizados por cada indicador e índices de calidad de suelo obtenidos de la ecuación de Andrews (2002) para los suelos de los distintos sitios.

Índice de Calidad (Andrews, 2002)					
	MC	MH	MA	A	P
MO	0.08	0.05	0.02	0.10	1.00
pH	0.85	0.86	0.85	0.93	1.00
SB	0.84	1.00	0.62	0.59	0.70
EA	0.43	0.11	0.09	0.93	1.00
Infiltración	0.65	0.15	0.19	1.00	0.99
Espesor	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
CICT	1.00	0.84	0.82	0.90	0.91
CE	0.20	0.08	0.21	1.00	0.94
PSI	0.29	0.2	0.57	1.00	0.92
Nitrógeno	0.02	0.14	0.17	0.56	1.00
<b>IC</b>	<b>0.536</b>	<b>0.443</b>	<b>0.454</b>	<b>0.801</b>	<b>0.946</b>



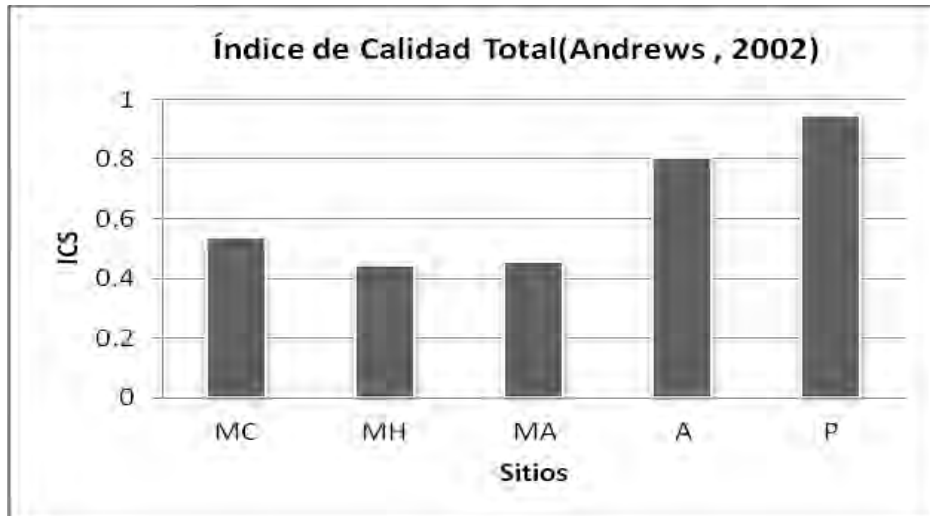


Figura 7. Variación de la Calidad del Suelo para cada sitio según el modelo de Andrews (2002).

Al observar los resultados obtenidos de ambos modelos (Figuras 6 y 7), se nota que la tendencia del ICS de los sitios es muy similar, el suelo del pastizal fue el que mejor calidad tuvo, seguido de la parcela agrícola y el matorral cerrado, los matorrales abiertos (MA y MH), fueron los que menor calidad presentaron (Figura 8). Sin embargo al analizar los valores del ICS, se encontró que de acuerdo al método de Cantú (2007) los valores de calidad fueron un poco más bajos y se ajustan mejor a las condiciones reales. Esta diferencia es más notoria en el sitio MH, donde de acuerdo con el método de Andrews (2002) obtuvo un ICS de 0.44 en tanto que según el método de Cantú (2007) el valor fue de 0.17, reflejando mejor la condición real del sitio (Figura 8).



Figura 8. Sitios numerados de acuerdo al índice de calidad del suelo, donde el número uno representa la mejor condición del suelo y el cinco la menos buena.

Las propiedades que mostraron una mayor correlación lineal positiva con el índice de calidad del suelo (Cuadro 12), son: infiltración, estabilidad de agregados, nitrógeno y materia orgánica, lo que significa que al aumentar el valor de estas propiedades la calidad del suelo es mejor, por otra parte, entre las que mostraron una mayor correlación negativa con el ICS están: conductividad eléctrica, PSI y el pH, en este sentido se entiende que al aumentar el valor de estas propiedades disminuye la calidad del suelo. De acuerdo con lo anterior se puede asumir que los principales problemas que afectan el funcionamiento de los suelos estudiados, están asociados a los que tienen que ver con la salinidad y sodicidad, con la

reducción de la tasa de infiltración y del contenido de nitrógeno y de materia orgánica.

Cuadro 12. Valores obtenidos del Coeficiente de correlación de Pearson y Determinación  $R^2$  entre el índice de calidad del suelo y las propiedades

<b>Propiedad</b>	<b>Coef. Correlación</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
MO	0.75	0.57
pH	-0.83	0.76
SB	-0.37	0.65
EA	0.92	0.30
Infiltración	0.92	0.96
CICT	0.45	0.20
CE	-0.94	0.27
PSI	-0.83	0.44
Nitrógeno	0.83	0.62

Siguiendo lo que plantean Karlen *et al.* (1997) y Herrick *et al.* (2002) respecto a la relación que hay entre las propiedades, los procesos y las funciones que el suelo hace, se puede establecer que propiedades como el nitrógeno y la materia orgánica son excelentes indicadores de los procesos biológicos del suelo ya que están directamente vinculadas con la transformación de los residuos orgánicos y la función que tiene el suelo de reciclar y proveer nutrientes, en este sentido tal y como lo señalan (Porta *et al.*, 2008) valores bajos de materia orgánica provocan alteraciones en el desarrollo de las comunidades de microorganismos y en consecuencia un reciclaje deficiente de nutrientes, este comportamiento puede deberse en parte al mal manejo del suelo y al exceso de sales del suelo sobre todo de sodio (Castro, 1996). Por otra parte bajos niveles de materia orgánica provocan una baja estabilidad de los agregados, lo que afecta al funcionamiento hídrico del suelo y a la resistencia contra la erosión.

Diversos autores (Lal *et al.*, 1999, Singh and Khera, 2009) mencionan que el cultivo intensivo puede causar cambios adversos en las propiedades físicas del suelo y reducir su calidad. Además, a medida que la intensidad de uso de la tierra

aumenta, cantidad de la cobertura del suelo y sus contribuciones disminuyen, la calidad y cantidad de carbono orgánico del suelo y la calidad del suelo se reducen; sin embargo para el caso particular de la parcela agrícola estudiada resultó tener una mejor calidad del suelo, que los sitios con vegetación natural. Esta situación inusual sólo puede ser atribuida a un buen manejo que se hace de la parcela, lo que ha permitido tener un nivel aceptable de materia orgánica y un buen control de la salinidad.

El análisis de las propiedades químicas evaluadas demuestran que los sitios con menor calidad del suelo, presentan problemas de degradación química del suelo debido al exceso de sales, principalmente de sodio, lo cual se atribuye a la mala calidad del agua de riego que se utiliza en la zona agrícola y que ha permeado a las áreas aledañas.

Por último cabe mencionar que los resultados obtenidos confirman la utilidad de los índices de calidad del suelo, las propiedades que se utilizaron son sencillos de obtener, tanto en campo como en el laboratorio y reflejan acertadamente la condición de calidad del suelo, diagnosticando las anomalías en el funcionamiento edáfico. En cambio cuando se utilizan por separado propiedades o parámetros unitarios para describir la situación de un elemento o proceso, frecuentemente ocurre que no refleja bien la condición del sistema o lo simplifica, de tal suerte que resulta inútil para la toma de decisiones. Por ello a menudo se recurre a la elaboración de índices o “conjunto de indicadores” que proveen información clave y completa, hacia los objetivos seleccionados determinando un éxito en la práctica propuesta (Ochoa, 2004)

## VII CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos demuestran que el uso del suelo o cobertura del terreno sí afecta la calidad del suelo.
- El pastizal (P) es el sitio con mejor calidad de suelo, es rico materia orgánica esto contribuye a la agregación del suelo, mejorando sus propiedades físicas y reduciendo la susceptibilidad a la erosión; además contiene altos niveles de nitrógeno.
- El mezquital abierto con vegetación halófito (MA) tiene la peor calidad, por los bajos valores de MO, CICT, infiltración y alto contenido de sodio intercambiable esto provoca el hinchamiento y/o dispersión del suelo, dificultando la infiltración del agua, la penetración de las raíces y la respiración de estas últimas. La baja calidad del mezquital abierto (MA) también es atribuible a la presencia de costras físicas sobre la superficie, los cuales impiden la infiltración del agua e incrementan la erosión.
- Entre las propiedades físicas más importantes para evaluar la calidad del suelo y que mostraron diferencias significativas en los distintos sitios evaluados destaca la textura, la porosidad, la estabilidad de agregados y la infiltración, lo que significa que el valor de estas propiedades hace que la calidad del suelo sea mejor o peor.
- Las propiedades químicas más significativas son materia orgánica, nitrógeno total, C.I.C.T, conductividad eléctrica.
- El índice de calidad de suelo propuesto por Cantú (2007) fue el que mejor mostró las diferencias entre la calidad de los suelos de los cinco sitios estudiados, demostrando que puede ser una herramienta útil para evaluar los suelos.

## 8.REFERENCIAS

- ◆ Acín, C.M 2012. Efectos de diferentes usos del territorio en las características edáficas: Influencia de una vía pecuaria en las funciones de regulación del suelo. Trabajo Fin de Master. Master Oficial en Ecología. Curso 2010. Universidad Autónoma de Madrid.
- ◆ Acosta, A. M.M. 2007. Determinación de metales pesados en suelos agrícolas. Tesis para obtener el título de licenciado en Biología. Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma del Estado de Hidalgo.
- ◆ Andrews, S.S; Karlen, D.L; Mitchel, J.P. 2002. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 90: 25–45.
- ◆ Aparicio, V.J; Costa, H; Echeverría, O. 2002. Sistemas de labranza de reciente incorporación en el sudeste Bonaerense: Evaluación de propiedades edáficas y crecimiento del maíz. *RIA* 31:55-71.
- ◆ Astier, C.M; Maass, M.M; Etchevers, B.J. 2002. Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia*, 36, 605-620.
- ◆ Batey T. 2009. Soil compaction and soil management – a review. *Soil Use and Management*: 25, 335–345.
- ◆ Bautista, C.A; Etchevers, B. J; Del Castillo, R.F; Gutiérrez, C. 2004. La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas*. Año XIII, N°2 Mayo- Agosto. Asociación Española de Ecología Terrestres. Alicante, España.
- ◆ Boix-Fayos, C; Calvos-Cases, A;Imeson, C; Soriano-Soto. M.D 2001. Influence of soil properties on the aggregation of some Mediterranean soils and the use of aggregate size and stability as land degradation indicators. *Catena* 44: 47-67.
- ◆ Castro Filho, C; Muzilli, M; Podanoschi, A.L. 1998. Estabilidad de dos agregados e sua relação- Podanoschi com o teor de carbono orgânico num Latossolo roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 22: 527-538.
- ◆ Campitelli, P; Aoki, A; Gudelj, O; Rubenacker, A; Sereno, R. 2010. Selección de indicadores de calidad de suelo para determinar los efectos del uso y práctica agrícolas en un área piloto de la región central de Córdoba. *Ciencia del Suelo* 28: pp 223-231.

- ◆ Cantú, P.M; Becker, A; Bedano, C.J; Schiavo, F.H. 2007 Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ciencia del Suelo* 25: pp.173-178.
- ◆ Carter, M.R., Gregorich, E.G., Anderson, D.W., Doran, J.W., Janzen, H.H. y Pierce, F.J. 1997. Concepts of soil quality and their significance. En *Soil quality for crop production and ecosystem health* (eds. Gregorich, E.G. y Carter, M.). Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Netherlands.
- ◆ Casanova, O.E.F. 2005. Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Central de Venezuela. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico.
- ◆ Castro, F.H.E. 1996. Bases técnicas para el conocimiento y manejo de los suelos del Valle Cálido del Alto Magdalena. Profesor Asistente Facultad de Agronomía, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Boyacá.
- ◆ Cerisola, C.I; García, M.G; Filgueira, R. R. 2005. Distribución de la porosidad de un suelo franco arcilloso (Alfisol) en condiciones semiáridas después de 15 años bajo siembra directa. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP, Calles 60 y 119, CC 31- (1900) La Plata- Buenos Aires, Argentina.
- ◆ Corinna, R. and J. Herrick. 2010. *Monitoring Rangeland Health . A Guide for Pastoralist Communities and Other Land Managers in Eastern Africa. Version II.* Nairobi, Kenya: ELMT-USAID/East Africa.
- ◆ Daddow, R; Warrington, G.R. 1983. Growth-limiting soil bulk densities as influenced by soil texture. USDA - f5, Watershed Systems Development Group rep. Wsd6-tn-00005, USDA - fs, fort Collins, Co. 203 pp.
- ◆ Delgado, E; Rosales, F; Trejos, J; Villalobos, M; Pocasangre, L. 2010. Índice de calidad y salud de suelos para plantaciones bananeras en cuatro países de América latina y el Caribe. *Bioagro* 22 (1): 53-60.
- ◆ Dexter, A.R; Richard, G; Arrouays, D; Jolivet, E.A; Duval,O. 2008. Complexed organic matter controls soil physical properties. *Geoderma* 144: 620–627.
- ◆ Doran J. W. y Parkin T. B. 1994. Defining and assessing soil quality. In: Doran J. W., Coleman D. C., Bezdicek D. C. y Stewart B. A. (eds). 1994. *Defining and Assessing Soil Quality for Sustainable Environment.* Soil Science Society of America. Special Publication 35. Madison, Wisconsin, USA.
- ◆ Duniway M. C., Bestelmeyer B. T., and Tugel A. 2010. *Soil Processes and Properties That Distinguish Ecological Sites and States.* Society for Range Management.

- ◆ Gabioud, A.E; Wilson, G.M; Sasal, M.C. 2011. Análisis de la estabilidad de agregados por el método de *Le Bissonnais* en tres órdenes de suelos. *Ciencia del Suelo*. 29:129-139.
- ◆ George, A. 2006. Estudio comparativo de indicadores de calidad de suelo en fincas de café orgánico y convencional en Turrialba, Costa Rica. Tesis para obtener el grado de Magister Scientiae en Agricultura Ecológica. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
- ◆ González-Quintero, L. 1968. Tipos de vegetación del valle del mezquital Hidalgo. Instituto Nacional de Antropología e Historia, México. 49 p.
- ◆ Haberern, J. 1992. Viewpoint: A Soil health index. *Journal of Soil and Water Conservation* 47: 6. Editorial/opinion paper, announcing the intent of the Rodale Institute to develop a "Soil Health Index".
- ◆ Hartemink, A.E.1998. Acidification and pH buffering capacity of Alluvial Soil Under Sugarcane. *Univertisy of \_technology, Department of Agriculture, PO Box 82, Lae, Papua New Guinea*. Volume 34, pp. 231-243.
- ◆ Hernández, H.R.M; Ramírez, E; Castro, I; Cano. S. 2008. Cambios en indicadores de calidad de suelos de ladera reforestados con pinos (*Pinus caribaea*) y eucaliptos (*Eucaplyptus robusta*). *Agrociencia* 42. N 3. Laboratorio de Biogeoquímica, IDECYT. Universidad Simón Rodríguez. Caracas, Venezuela.
- ◆ Hernández, M.M.M. 2001. Caracterización y evaluación del recurso suelo mediante la aplicación de un sistema de información geográfica en el alto Mezquital, Hidalgo. Tesis para obtener el título de Bióloga. UNAM- Facultad de Estudios Superiores Iztacala. Los reyes Iztacala, Estado de México.
- ◆ Herrick J. E., Brown J.R., Tugel A. J., Shaver P. L. and Havstad K.M. 2002. Application of Soil Quality to Monitoring and Management: Paradigms from Rangeland Ecology *Agronomy Journal*, VOL. 94.
- ◆ Hillel, D. 1982. *Introduction to soil physics*. 2nd ed. Academic Press, San diego, CA.
- ◆ Jaramillo, J.D.F. 2002. *Introducción a la ciencia del suelo*. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Medellín.
- ◆ Jiménez, M.V. 1999. Propagación y producción de especies *Prosopis laevigata* (*Humb. Bonpl. Ex Willd*) M.C Johnston, *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit. Y *Mimosa depauperata* de importancia forestal no maderable en "El Dexthi" San Juanico", Mpio. De Ixmiquilpan, Hdgo. Tesis para obtener el título de Bióloga.



UNAM-Escuela Nacional de Estudios Profesionales Iztacala. Tlalnepantla, Estado de México 1999.

- ◆ Karlen, D.L.; Mausbach M.J; Doran J.W; Cline R.G; Harris R.F; Schuman G.E. 1997. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 61:4-10.
- ◆ Lal, R; Mokma, D; Lowery, L.1999. Relation between soil quality and erosion, pp. 237–258, in R. Lal, ed., *Soil quality and soil erosion*. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, IO.
- ◆ Larson, W.E; Pierce, F.J. 1991. Conservation and enhancement of soil quality.p. 175-203. In: *Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing Word*, Vol. 2: Technical papers. Bangkok, Thailand: International Board for Research and Management, 1991. IBSRAM Proceedings No. 12 (2).
- ◆ Luters, A; Salazar, L.J.C. 2000. Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. Instituto de Suelos. Argentina.
- ◆ Martínez, J.L. 2006. Modelo para evaluar la calidad de las tierras del cultivo de papa. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. *Agronomía Colombiana* 24 (1): 96-110.
- ◆ Meza P., E y Geissert K., D. 2003. Estructura, agregación y porosidad en los suelos forestales y cultivados de origen volcánico del cofre de Perote, Veracruz, México. *Foresta Veracruzana* 5:57-60.
- ◆ Morales, V. P. 2011. Análisis de varianza para variar nuestras independientes. Universidad Pontificia Comillas, Madrid. Facultad de Ciencias Humanas y Sociales.
- ◆ Muñoz, I.J.D. 1999. Estudio cartográfico y morfológico de los suelos de la porción sur del Valle del Mezquital. Tesis para obtener el grado académico de : Maestro en Ciencias (Biología). UNAM. Facultad de Ciencias División de Estudios de Posgrado. México, D.F.
- ◆ Muñoz, I. J.D; Soler, A.A; López, G.F; Hernández, M.M. 2013, Edafología: Manual de métodos de análisis del suelo. UNAM- Facultad de Estudios Superiores Iztacala. Tlalnepantla, Edo. de México.
- ◆ Muñoz, A.M. 2009. Diagnostico ambiental de la Sub-cuenca de Otumba, Estado de México. Tesis para obtener el título de Bióloga. Facultad de Estudios Superiores Iztacala- UNAM. Reyes Iztacala, Estado de México.
- ◆ Navarrete, S.A; Vela, C.G; López, B. j; Rodríguez, G.M.L. 2011. Naturaleza y utilidad de los indicadores de calidad del suelo. *Revista contactos*, pp. 29-37.

- ◆ Norfleet, M.L.; Ditzler, W.E.; Puckett, R.B.; Grossman, J.N. 2003. Soil quality and its relationship to pedology. *Soil Science* 168: 149-155.
- ◆ Nuñez, S.J. 1946. *Fundamentos de edafología*. Tercera reimpresión de la segunda edición. San José, C.R: EUNED, 2000. Costa Rica.
- ◆ Ochoa, B.J.P. 2004. *Evaluación de Índices de Calidad de suelos cultivados con banano en fincas comerciales típicas del Valle de Sula, Honduras*. Proyecto especial presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Agrónomo en el Grado de Académico de Licenciatura. ZAMORANO. Carrera de Ciencias y Producción Agropecuaria.
- ◆ Ospina, A; Florentino, A; Velázquez, L; Araujo, D. 2006. *Evaluación de la calidad física del suelo bajo diferentes sistemas de labranza y rotación de cultivos en Turén, Estado Portuguesa*. Instituto de Edafología. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela.
- ◆ Pacheco, L.J.E. 1970. *Diagnostico de un suelo no productivo de Buenos Aires, Provincia de Puntarenas, Costa Rica*. Tesis de grado de Magister Scientiae. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA. Centro de Enseñanza e Investigación. Turrialba. Costa Rica.
- ◆ Pérez, L.J.M. 2011. *Manual para determinar la calidad del agua para riego agrícola*. Ingeniero Agrónomo. Trabajo de Experiencia Recepcional. Universidad Veracruzana. Facultad de Ciencias Agrícolas. Xalapa de Enríquez, Veracruz.
- ◆ Peters P. C. D., Bestelmeyer T. B., Herrick E. J., Fredrickson Ed. L., Monger H. C. and Havstad M. K. 2006. *Disentangling Complex Landscapes: New Insights into Arid and Semiarid System Dynamics*. *BioScience*. Vol. 56 No. 6. 491- 501 pp.
- ◆ Porta, J., M. López-Acevedo y C. Roquero. 2003. *Edafología: para la agricultura y el medio ambiente*. 3º. Edición. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.
- ◆ Porta, J; López, A.M y Poch, M.R. 2008. *Introducción a la edafología: Uso y protección del suelo*. Madrid: ediciones mundi-prensa. 451pp.
- ◆ Rodríguez, N; Florentino, A; Torres, D; Yendis, H; Zamora, F. 2009. *Selección de indicadores de calidad de suelo en tres tipos de uso de la tierra en la planicie de Coro estado Falcón*. *Rev. Fac. Agron. (LUZ)*. 26: 340-361.
- ◆ Rucks L; García F; Kaplán A; Ponce de León J; Hill M. 2004. *Propiedades físicas del suelo*. Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.
- ◆ Tate, R.L. 1995. *Soil microbiology*. John Wiley & Sons, New York.

- ◆ Threadgill E.D., 1982. Residual tillage effects as determined by cone index. Transactions of the ASAE 25, 859-863.
- ◆ SEMARNAT. 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Publicado el 31 de diciembre de 2002 en el Diario Oficial de la Federación. Segunda Sección. México. 73 p.
- ◆ Schaetzl and Anderson. 2005. *Soils: Genesis and Geomorphology*. Cambridge Univ. Press. 832 pp.
- ◆ Schoenholtz, S.H., Van Miegroet, H., Burger, J.A., 2000. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. *Forest Ecology and Management* 138, 335–356.
- ◆ Shukla, M.K; Lal, R; Ebinger, M. 2005. Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil & Tillage Research*. Pp. 2-11
- ◆ Singh, J. and Khera L. 2009. Physical Indicators of Soil Quality in Relation to Soil Erodibility Under Different Land Uses *Arid Land Research and Management*, 23:152–167,
- ◆ Stadtmüller, T.1994. Impacto hidrológico del manejo forestal de bosques naturales tropicales medidas para mitigarlo. Proyecto silvicultura de bosques naturales.
- ◆ Stocking, M; Mumaghan, N. 2003. Manual para la evaluación de campo de la degradación de la tierra. Ediciones Mundi-prensa, Barcelona.
- ◆ USDA. 1999. Soil Quality Test Kit Guide. United States Dept. of Agriculture, Agricultural Research Services, Natural Resources Conservation Service, Soil Quality Institute. 80 pp.
- ◆ Vázquez, M.N.C. 2012. Evaluación del estado actual de la degradación de tierras en la micro cuenca “La muñeca” en el alto mezquital, Ixmiquilpan, Hidalgo. Tesis para obtener el título de Bióloga. UNAM. Facultad de Estudios Superiores Iztacala.
- ◆ Vergara, S.M.A; Etchevers, B.J; Padilla, C.J. 2005. La fertilidad de los suelos de ladera de la sierra norte de Oaxaca, México. *Agrociencia*, vol 39, núm.3, mayo-junio, 2005, pp. 259-266. Colegio de Postgraduados. Texcoco, México.
- ◆ Venialgo, C.C; Ingaramo, O; Moro, E; Oleszczuk.J.D. Asselborn. A. 2001. El proceso de infiltración en parcelas agrícolas de la provincia del Chaco. Cátedra de conservación y manejo de suelos-Facultad de Ciencias Agrarias-UNNE. Sargento Cabral 2131- (3400) Corrientes-Argentina.

- ◆ Villarreal, R.M; Parra, T.S; Sánchez, P.P; Hernández, V.S; Osuna, E.T; Basalio, H.J. 2010. Cobertura vegetal, vermicompost y actividad microbiana del suelos en la producción de tomate. Revista mexicana de ciencias agrícolas. Vol. 1. No 2. Texcoco abr./jun 2010.
- ◆ Videla, S.L; Rostagno, M.C; Toyos, M.A. 2008. La materia orgánica particulada: comparación de Métodos para su determinación y su valor como indicador de calidad de suelos del Chubut. Cl. Suelo (Argentina) 26 (2): pp 219-227.
- ◆ Wezel, A. J; Rajot, I; Herbrig,C. 2000. Influence of shrubs on soil characteristics and their function in Sahelian agro-ecosystems in semi-arid Niger. Journal of Arid Environments 44: 383–398
- ◆ Zar , J. 1999. Biostatistical Analysis. Prentice Hall. 4ª edición. New Jersey. 663 p. 570.1 Z36

## ANEXO

### **Alternativas para mejorar la calidad de los suelos estudiados.**

- La calidad del suelo es dinámica y puede cambiar en el corto plazo, de acuerdo con el uso y prácticas de manejo, para conservarla es necesario implementar prácticas sustentables en el tiempo. Se deberá mantener en buenas condiciones el espacio poroso, mejorar la textura y los niveles de materia orgánica del suelo. Es decir, incrementar la infiltración del agua y aumentar la evapotranspiración.
- En la parcela agrícola, es importante continuar manejándola del mismo modo, ya que se comprobó que es eficiente, sin embargo de manera experimental se podría probar sistemas de siembra directa (labranza cero) en la que el cultivo se siembra directamente sobre el rastrojo del cultivo anterior, la remoción del suelo es mínima y la cobertura es la mayor que se puede obtener, contribuyendo a una mejor infiltración y almacenamiento de agua. Otra forma de manejo adecuada es la labranza superficial (labranza reducida) en la que el suelos no se ara y la cama de siembra se prepara con implementos de discos o con cultivares de campo produciendo una remoción sólo superficial (8 a 12 centímetros) ayudando sólo a romper costras y compactaciones superficiales. Una más es la labranza vertical (labranza bajo cubierta) que se aplica con el fin de agrietar el suelo en profundidad y favorecer la aireación y el funcionamiento normal de los procesos biológicos. Estas prácticas deberán completarse con rotaciones de cultivos con la finalidad de incrementar el contenido de materia orgánica y la protección del suelo, buscando con ello reducir los niveles de erosión. Son alternativas variables para mantener o mejorar las propiedades físicas, biológicas y químicas del suelo, con ello su fertilidad. Además la aplicación de abonos orgánicos permitirá restituir las pérdidas de nutrientes importantes como el nitrógeno.

- Para mantener el pastizal en buen estado, se recomienda un periodo de descanso del uso pecuario para permitir la recuperación de especies vegetales. Es decir, una rotación en la utilización de la pastura. Los sistemas de pastoreo buscan mantener en óptimas condiciones el pastizal, así logran una producción máxima.
- La salinización es un proceso parcialmente reversible. El agua puede lixiviar las sales hacia horizontes profundos, dando lugar a una lenta recuperación natural. Para la recuperación de suelos salinos es necesario aplicar practicas de manejos tendientes a mejorar las condiciones hidrofísicas del suelo, mantener la cobertura vegetal existente reduce la erosión, la pérdida de humedad por evaporación y aumenta la porosidad. En suelos carentes de vegetación el proceso suele ser más lento, por lo cual es necesario realizar una cobertura de la superficie del suelo con materia orgánica.
- Los suelos realizan importantes funciones como sustento de las producciones agrícolas y ganaderas, por lo que realizar prácticas de manejo ayudará a renovar la reserva de nutrientes, y así conservar su fertilidad.