



Casa abierta al tiempo
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

EVALUACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO
ORGÁNICO EN LOS SUELOS DE LAS
NOPALERAS DE MILPA ALTA Y SUS BENEFICIOS
AMBIENTALES

Tesis que presenta

Alfredo Nicolás González

Para obtener el grado de

Maestro en Ciencias (Energía y Medio Ambiente)



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
UNIDAD
IZTAPALAPA

POSGRADO EN ENERGÍA Y
MEDIO AMBIENTE

EVALUACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO EN LOS SUELOS DE LAS NOPALERAS
DE MILPA ALTA Y SUS BENEFICIOS AMBIENTALES

TESIS

Que para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS
(ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE)

PRESENTA

Alfredo Nicolás González

Director

Dr. Juan Gabriel Rivera Martínez

Coasesores

Dra. Beatriz Adriana Silva Torres

Dr. Gilberto Vela Correa

México D.F., 2 de Septiembre de 2015

Agradecimientos

La Maestría en Ciencias (Energía y Medio Ambiente) de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, pertenece al Padrón Nacional de Posgrados de Calidad del CONACyT y cuenta con apoyo del mismo Consejo con el convenio 003893; por lo que agradece la beca recibida, a través del convenio No. 555032 para el desarrollo de esta tesis.

Esta tesis fue desarrollada gracias al apoyo recibido para la elaboración del proyecto “Evaluación del contenido de carbono orgánico en los suelos de las nopaleras de milpa alta y sus beneficios ambientales” otorgado por el CONACyT según el convenio No. 555032.

Agradecimientos personales

Quiero manifestar mi agradecimiento a las personas e instituciones que me permitieron la elaboración del presente trabajo de tesis.

A la Universidad Autónoma Metropolitana, por haberme permitido ser parte de la institución y realizar mis estudios de maestría. Al posgrado de Energía y Medio Ambiente y al personal académico, por la orientación y apoyo que me brindaron durante el desarrollo de la maestría.

A mi director de tesis, Juan Gabriel Rivera Martínez por su valioso apoyo, orientación y amistad durante el desarrollo de esta tesis. A mis asesores Beatriz Silva Torres y Gilberto Vela Correa, por sus valiosa orientación y comentarios para la escritura de esta tesis.

A mis compañeros de la maestría en Energías y Medio Ambiente, por su valiosa amistad y retroalimentación de conocimientos. A los compañeros de la licenciatura en Producción Animal que han hecho más ameno mi paso por la maestría.

A mí querida familia. A mi hermana Angélica que con su compañía, orientación y apoyo me ha ayudado a salir de las situaciones adversas. Mi hermano Heriberto con el que siempre he contado, su apoyo e interés me ha ayudado a no detenerme. Dedico este trabajo en especial a mis señores padres Arcadio y Emma, quienes a través de sus esfuerzos y ejemplo me han enseñado a seguir adelante.

COMITÉ TUTORIAL

Director

Juan Gabriel Rivera Martínez

Departamento de Biología de la Reproducción, División de Ciencias Biológicas y de la Salud. Universidad Autónoma Metropolitana unidad Iztapalapa.

Asesor

Beatriz Adriana Silva Torres

Departamento de Biología, División de Ciencias Biológicas y de la Salud. Universidad Autónoma Metropolitana unidad Iztapalapa

Asesor

Gilberto Vela Correa

Departamento del Hombre y su Ambiente, División de Ciencias Biológicas y de la Salud. Universidad Autónoma Metropolitana unidad Xochimilco.

El jurado designado por la
Comisión Académica del Posgrado en Energía y Medio Ambiente

de la Unidad Iztapalapa, aprobó la tesis que presentó

Alfredo Nicolás González

El día 2 de septiembre del año 2015

Miembros del jurado

Beatriz Adriana Silva Torres

Presidente

José Luis Miguel Castillo González

Secretario

Gilberto Vela Correa

Vocal



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

ACTA DE EXAMEN DE GRADO

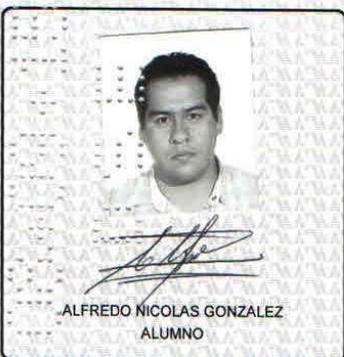
No. 00007

Matricula: 2131800730

EVALUACION DEL CONTENIDO DE CARBONO ORGANICO EN LOS SUELOS DE LAS NOPALERAS DE MILPA ALTA Y SUS BENEFICIOS AMBIENTALES

En México, D.F., se presentaron a las 15:00 horas del día 2 del mes de septiembre del año 2015 en la Unidad Iztapalapa de la Universidad Autónoma Metropolitana, los suscritos miembros del jurado:

DRA. BEATRIZ ADRIANA SILVA TORRES
DR. GILBERTO VELA CORREA
M. EN C. MIGUEL CASTILLO GONZALEZ



ALFREDO NICOLAS GONZALEZ
ALUMNO

Bajo la Presidencia de la primera y con carácter de Secretario el último, se reunieron para proceder al Examen de Grado cuya denominación aparece al margen, para la obtención del grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS (ENERGIA Y MEDIO AMBIENTE)

DE: ALFREDO NICOLAS GONZALEZ

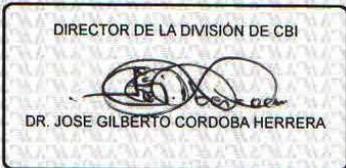
y de acuerdo con el artículo 78 fracción III del Reglamento de Estudios Superiores de la Universidad Autónoma Metropolitana, los miembros del jurado resolvieron:

APROBAR



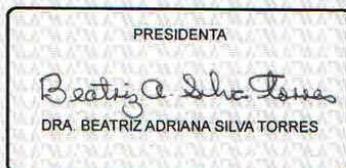
LIC. JULIO CESAR DELARA ISASSI
DIRECTOR DE SISTEMAS ESCOLARES

Acto continuo, la presidenta del jurado comunicó al interesado el resultado de la evaluación y, en caso aprobatorio, le fue tomada la protesta.



DIRECTOR DE LA DIVISION DE CBI

DR. JOSE GILBERTO CORDOBA HERRERA



PRESIDENTA

DRA. BEATRIZ ADRIANA SILVA TORRES



VOCAL

DR. GILBERTO VELA CORREA



SECRETARIO

M. EN C. MIGUEL CASTILLO GONZALEZ

Contenido

Resumen.....	1
Abstract	2
Capítulo 1. Introducción.....	3
1.1 Estructura de la tesis.....	6
Capítulo 2. Problemas ambientales y captura de carbono	8
2.1 Problemática Medioambiental.....	8
2.1.1 Ecosistema y servicios ambientales.....	8
2.1.2 Impacto ambiental Antropogénico.....	10
2.1.3 Calentamiento global, efecto invernadero y gases de efecto invernadero.....	12
2.2 Acciones para la mitigación de CO ₂	14
2.2.1 Antecedentes.....	15
2.2.2 Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático	15
2.2.3 Protocolo de Kioto	17
2.2.3.1 Mecanismos flexibles	19
2.2.4 México ante el cambio climático.....	21
2.2.4.1 Emisión de gases de efecto invernadero y participación de México en los mecanismos de desarrollo limpio.....	22
2.3 Captura de carbono.....	24
2.3.1 Ciclo de carbono y sumidero de carbono	25
2.3.2 Captura de carbono en plantas y suelos	27
Capítulo 3 Suelos y sus servicios ambientales.....	28
3.1 Características y tipos de suelos.....	28
3.2 Servicios ambientales de los suelos	32
3.3 Importancia del suelo como reservorio de carbono.....	34
3.4 Materia orgánica en suelos	34
3.5 Suelos agrícolas.....	35
3.6 Manejo de suelos agrícolas para captura de carbono	37
3.6.1 Agricultura de conservación.....	37

3.6.2 Manejo de suelos agrícolas con estiércol.....	40
Capítulo 4. Desarrollo agrícola en el Valle de México y producción de nopal en Milpa Alta al sur del Distrito Federal.....	42
4.1 Desarrollo de la agricultura en el Valle de México.....	42
4.1.1 Producción agrícola en el Distrito Federal.....	42
4.1.2 Datos productivos del Distrito Federal.....	43
4.2 Producción de nopal.....	44
4.2.1 Antecedentes del Nopal en México.....	46
4.2.2 Características del nopal.....	47
4.2.2.1 Taxonomía del nopal verdura.....	48
4.2.3 Uso de nopales como recurso natural.....	49
4.3 Producción de Nopal en la delegación Milpa Alta.....	50
4.3.1 Desarrollo de la producción de nopal en Milpa Alta.....	50
4.3.2 Manejo de las parcelas del cultivo nopal.....	51
4.3.3 Uso de estiércol en la producción de nopal.....	54
4.4 Características de la zona de estudio.....	55
4.4.1 Características fisiográficas de la delegación Milpa Alta.....	56
4.4.2 Características bióticas.....	59
4.4.3 Descripción de las parcelas.....	60
CAPITULO 5. METODOLOGÍA.....	63
5.1 Muestreo.....	64
5.2 Toma y manejo de muestras.....	64
5.3 Trabajo de laboratorio.....	65
5.3.1 Análisis físicos de suelos en laboratorio.....	66
5.3.2 Análisis Químicos de suelos en laboratorio.....	67
5.4 Análisis estadístico.....	69
5.5 Preguntas de investigación.....	70
5.6 Hipótesis.....	70
5.7 Objetivos.....	70
CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	72
6.1 Características fisiográficas de la parcela.....	72
6.2 Propiedades físicas de los suelos de las parcelas.....	73

6.2.1 Suelos a profundidad de 0 a 20 centímetros.....	73
6.2.2 Suelos a profundidad de 20 a 40 centímetros	79
6.3 Propiedades químicas de los suelos de las parcelas	84
6.3.1 Suelos a profundidad de 0 a 20 centímetros.....	84
6.3.2 Suelos a profundidad de 20 a 40 centímetros	91
6.4 Valores de carbono orgánico total en los suelos de las parcelas	96
6.4.1 Carbono orgánico total de las parcelas a profundidad de 0 a 20 centímetros.....	97
6.4.2 Carbono orgánico total de las parcelas a profundidad de 20 a 40 centímetros	98
6.4.3 Carbono orgánico total entre cultivo de maíz y nopal de 0 a 20 cm de profundidad	100
6.4.4 Carbono orgánico total entre cultivo de maíz y nopal de 20 a 40 cm de profundidad.....	103
6.5. Servicios ambientales brindados por los cultivos intensivos de nopal de la delegación Milpa Alta.	105
6.5.1 Carbono orgánico en el cultivo de nopal.....	106
6.5.2 Servicios ambientales en los cultivos de nopal.....	111
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES	113
7.1 Perspectivas	114
Bibliografía.....	115
Anexos.....	124

Resumen

Durante las últimas décadas en uso indiscriminado de energía fósil ha sobrepasado la capacidad natural de los ecosistemas de auto-regularse. La captura y secuestro de carbono en suelos agrícolas es una estrategia que intenta mitigar problemas relacionados con los altos niveles de CO₂ atmosféricos y la degradación de suelos. Los suelos agrícolas pueden ser manejados con la agricultura de conservación para secuestrar carbono. Este tipo de manejo, también, presta diferentes servicios ambientales para el hombre. El cultivo de nopal verdura en la delegación Milpa Alta, por sus características de manejo, se acerca a la agricultura de conservación debido a que existe poca perturbación física de sus suelos, es una planta perenne y fertilizado con estiércol fresco de bovino. Se espera que los cultivos de nopal verdura tengan valores altos en los niveles de Carbono Orgánico del Suelo (COS) debido a su manejo, siendo una opción para la disminución del CO₂ atmosférico y la obtención servicios ambientales como el secuestro de carbono y producción de alimentos. El objetivo de este trabajo fue evaluar los niveles de COS de las nopaleras de la delegación Milpa Alta, determinando sus características fisicoquímicas y los servicios ambientales que estos suelos pueden prestar. Para llevar a cabo la evaluación se muestrearon suelos de 3 parcelas de nopal y una de maíz a dos profundidades, de 0 a 20 y de 20 a 40 cm. Las variables estudiadas de los suelos fueron, COS, densidad aparente y real, porosidad, humedad, pH y cationes intercambiables. Se realizó el análisis estadístico de t de student para comparar COS entre cultivos y ANOVA para el resto de las variables entre las parcelas muestreadas. Para la profundidad de 0 a 20 cm se encontraron diferencias significativas en el contenido de COS entre cultivos y entre parcelas para humedad y magnesio. A profundidad de 20 a 40 cm solo se encontró diferencia significativa entre parcelas para densidad aparente, humedad y porosidad. Se encontraron mayores niveles de COS de las nopaleras que en la de maíz a profundidad de 0 a 20 cm, debido principalmente a la adición de materia orgánica. Consecuentemente las características fisicoquímicas de los suelos de nopal fueron mejores. Estos resultados coinciden con lo reportado con diferentes autores que señalan que la adición de estiércol animal aumenta los niveles de COS y mejora características físicas y químicas de suelos. A profundidad de 20 a 40 cm los valores del suelo entre cultivos tendieron reducirse y a homogenizarse. Sin embargo, el nopal es un cultivo perenne, por lo que los suelos son más estables y por tanto el COS permanece capturado por mayor tiempo. Los servicios ambientales en los suelos del cultivo de nopal son captura de carbono, evitando que este se encuentre en la atmósfera; reciclaje de nutrientes, al utilizarse estiércol bovino fresco; producción de biomasa, en forma de nopal verdura así como el mejoramiento físico-químico del suelo.

Abstract

During last decades the indiscriminate use of fossil energy has overpassed the natural capacity of ecosystems of self regulate. The carbon capture and sequestration in soils is a strategy that tries to mitigate problems related with high levels of atmospheric CO₂ and degraded soils. The agricultural soils can be managed with conservation agriculture to carbon sequestration. This type of management, as well, provides ecosystem services to humanity. The nopal verdure crop in Milpa Alta delegation, because of its management characteristics, approaches to conservation agriculture because there is little physics perturbation on its soil, is a perennial plant and is fertilized with green bovine manure. It is expected that nopal crops have high values in levels of soil organic carbon (SOC) because of its management, being an option for reducing atmospheric CO₂ and provides ecosystem services like carbon sequester and food production. The aim of this research was to evaluate the levels of SOC of nopal crops of the Milpa Alta delegation, determining physicochemical characteristics and the ecosystem services it can offer. To carry out the assessment of soil 3 plots nopal and a plot of maize were sampled at two depths, 0-20 and 20-40 cm. The variables of soil assessed were SOC, bulk density, total density, porosity, moisture, pH and exchangeable cations. Statistical analyses were performed using Student t to compare SOC between crops and ANOVA was performed to compare the rest of variables between plots sampled. Significant difference was found in SOC content between crops and between plots moisture and magnesium at depth of 0-20 cm. At depth of 20-40 cm significance difference was found only between plots for bulk density, moisture and porosity. Higher levels of SOC in nopal crops were found than maize at depth of 0-20 cm, it mainly due to the addition of organic matter. Consequently physicochemical characteristics of nopal crop soils were better. These results agree with several authors who reported that the addition of animal manure increases the SOC levels and improve physical and chemical characteristics of soil. At depth of 20-40 cm, soil values between crops tended to be reduced and homogenized. However, nopal is a perennial crop, so the soils are more stables and SOC is maintained captured longer. Ecological services in soil of nopal crops are carbon sequestration, avoiding be in the atmosphere; nutrient recycle, with the use of green bovine manure; biomass production, in the form of nopal verdure, as well as physics-chemical improving soil.

Capítulo 1. Introducción

Ciudad de México tiene una larga historia de la agricultura y, a pesar del crecimiento industrial actividades agrícolas persisten dentro de sus límites. Sistemas agrícolas complejos tienen sus raíces en la época prehispánica, desde entonces se han modificado y adaptado con la introducción de herramientas de metal, los animales domésticos y las plantas durante la época colonial española. Más recientemente, algunos elementos de la tecnología de la Revolución Verde se han adaptado al cultivo así como al constante acoso del crecimiento permanente de la ciudad hacia las áreas de cultivo.

Los daños al medio ambiente realizados por el hombre han ocasionado que la capacidad de auto-regeneración de los ecosistemas (aire, agua y suelo) haya sido rebasada y con ello los ciclos naturales se han visto alterados. Entre los problemas se puede mencionar la contaminación de cuerpos de agua, deforestación, pérdida de biodiversidad, contaminación atmosférica y el denominado cambio climático, que está dando como resultados cambios en los patrones del clima.

El cambio climático se ha revelado en las últimas décadas como uno de los problemas globales más relevantes a los que el ser humano se enfrenta. El uso de combustibles fósiles para el funcionamiento de la industria y el estilo de vida actual, son el principal causante de adversidades relacionadas con que la temperatura global del planeta vaya en aumento. El problema se encuentra principalmente en los gases que se generan como resultado de la combustión de estos combustibles fósiles, los cuales se denominan gases de efecto invernadero (GEI) y son causante del denominado efecto invernadero (Erikson, 1994). La generación masiva de estos gases, más allá de los límites naturales, implica el incremento en la temperatura media de la tierra. El CO₂ es, de entre los diferentes gases, el GEI más importante por la magnitud de su liberación a la atmosfera, que es el más alto.

La lucha contra este fenómeno se ha materializado, desde la perspectiva jurídica, en dos tratados internacionales: la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático y el Protocolo de Kioto (Saura, 2003).

La principal medida que se ha propuesto es la mitigación del CO₂ a través de reducir la concentración presente en la atmosfera y la disminución de emisiones realizada por el hombre. Respecto a la disminución de CO₂ atmosférico, se plantea aprovechar la capacidad del suelo para almacenar CO₂ a través de su captura por la vegetación. Los suelos es donde el CO₂ puede estar almacenado por mayor tiempo el carbono. Este proceso de captura de carbono, además puede aumentar la fertilidad del suelo debido a la una mayor presencia de materia orgánica. Esta característica hace de los suelos ricos en vegetación un óptimo sumidero de carbono. Sin embargo la alteración de los suelos, como por ejemplo la actividad agrícola, puede impactar en los niveles de carbono orgánico.

Los suelos agrícolas tradicionalmente se consideran como un emisor de carbono, sin embargo y según su dinámica de manejo, también puede ser considerado como un sumidero. Los suelos agrícolas convencionales al ser descubiertos de toda vegetación y ser removidos en su laboreo, disminuye su cantidad de carbono por la acción del contacto con el aire y el sol, además que al exigir cantidades productivas se suelo se va agotando en nutrientes, llevando a una erosión en el suelo. La pérdida de carbono ocurre principalmente en forma de CO₂.

Actualmente las prácticas agrícolas han buscado una relación más amigable con el medio ambiente bajo diferentes manejos, para reducir los impactos negativos de esta práctica a los suelos y medio ambiente en general. Estas propuestas también buscan considerar a los cultivos agrícolas como un sumidero de carbono, principalmente los cultivos perennes. Algunas de las prácticas realizadas son la disminución de la labranza y la aplicación de abonos de origen animal como lo es el estiércol.

Uno de los cultivos representativos del Valle de México es el cultivo intensivo de nopal, el cual es una planta perteneciente a las cactáceas y que por su afinidad a zonas áridas está ampliamente distribuido en el territorio Mexicano. Entre sus diferentes usos (principalmente como plata forrajera en climas áridos o semiáridos) el nopal es utilizado también como verdura tierna en gran parte del país, por lo que es considerado un cultivo importante en el consumo nacional.

En el Valle de México al sur del distrito federal, en la delegación milpa alta la práctica del cultivo del nopal desplazo a la del cultivo tradicional del maíz. Actualmente es la mayor zona de producción de este cultivo a nivel nacional. Tradicionalmente, los campesinos de Milpa Alta manejan los suelos de sus nopaleras con la adición de estiércol fresco, principalmente de bovino y una labranza mínima. En la práctica esto ha permitido obtener altos rendimientos en la producción de su cultivo, reflejándose en un mayor beneficio económico en la venta del producto durante todo el año. Las características tradicionales del cultivo desarrolladas por los productores de nopal son: la utilización de un promedio de 600 ton/ha/año de estiércol fresco, un promedio de 52 cortes por año, un promedio de 45 a 50 ton/año, un promedio de vida de la plantación de 15 a 20 años y el establecimiento de tres claras temporadas de producción relacionadas con el precio del producto.

El manejo productivo del nopal y al ser una planta perenne, pueden acercarse a las características necesarias para almacenar carbono en suelos. Con lo anterior es posible que este cultivo repercuta positivamente en beneficios al medio ambiente relacionados con el carbono orgánico presente en suelo, mismos beneficios que el ambiente provee al hombre como servicios ambientales, principalmente en ámbitos de ciudad. Pues en otras condiciones los estiércoles de las vacas lecheras, que aun predominan en la ciudad así como en la periferia, serían considerados como contaminantes.

Los servicios ambientales son los elementos que el hombre ha tomado del medio ambiente para garantizar su sobrevivencia, elementos que pueden comprender desde aire y agua hasta alimentos y materiales para refugio. El suelo es un elemento clave para la provisión de estos servicios, estando ligado con la producción de biomasa, regulación del ciclo de agua, reducción de gases dañinos para el ser humano y producción de oxígeno entre otros. El carbono orgánico está ligado a la provisión de estos servicios, por lo que es de suma importancia el cuidado de los suelos para garantizar el buen funcionamiento del ecosistema y garantizar la presencia del hombre en este. Además este tipo de cultivos han detenido el crecimiento de la mancha urbana pues son económicamente más redituables que la expansión irregular de los

asentamientos. En base a la información de Rivera (2002), el 93% de la población de Milpa Alta se benefician de la actividad nopalera.

En este trabajo de investigación se evaluaron los niveles de carbono orgánico total presentes en 3 parcelas de nopal en la delegación Milpa Alta; utilizando la técnica de combustión húmeda. Se complementó el estudio en laboratorio con análisis físicos (densidad aparente, densidad real, porosidad y humedad) y químicos (pH, materia orgánica y bases intercambiables) del suelo. Los resultados se compararon con el mismo tipo de mediciones en una parcela de maíz de manejo tradicional. En base a los resultados se evaluaron la presencia de materia orgánica, carbono orgánico, pH, cationes intercambiables, densidad real y aparente, porosidad y humedad. Con la finalidad de estimar el potencial del servicio ambiental que presenta el cultivo del nopal en términos de carbono orgánico.

1.1 Estructura de la tesis

El capítulo es una breve introducción, donde se ofrece un panorama general de la situación ambiental y las medidas para mitigar los daños, principalmente por el uso de combustibles fósiles, enfatizando los sistemas intensivos de suelos agrícolas. El segundo capítulo hace referencia a los problemas medioambientales resultado del desarrollo del hombre y su excesivo uso de combustibles fósiles. Las políticas implementadas para la mitigación de los Gases de Efecto Invernadero. Tocando la importancia que el carbono y su ciclo tienen para la mitigación del CO₂ atmosférico. El capítulo tres trata de la importancia que los suelos tienen en el sistema terrestre y el uso benéfico que el hombre les ha dado al obtener bienes de ellos, como la agricultura; se expone los tipos de suelos y la importancia que estos tienen como reservorio de carbono, así como la los sistemas de manejo agrícola para retener y/o aumentar los niveles de carbono orgánico. En el capítulo cuatro se expone la temática de la agricultura en México, específicamente al sur de la Ciudad de México; los diferentes cultivos presentes al sur del Distrito Federal, destacando el cultivo perenne de nopal verdura, presente en la delegación Milpa Alta. En el capítulo cinco se describen la

hipótesis y el objetivo general de la investigación, además de los objetivos específicos y preguntas de investigación. El capítulo seis describe la zona de trabajo y la metodología que se utilizó; las características biológicas, sociales y productivas de la delegación, y una breve descripción de las parcelas muestreadas. Asimismo se describen los métodos de laboratorio que se utilizaron para el análisis de las muestras, y se presentan los resultados concretos de los análisis. En el capítulo siete se incluye la discusión y las conclusiones.

Capítulo 2. Problemas ambientales y captura de carbono

2.1 Problemática Medioambiental

El ser humano, a través de las etapas de su desarrollo, ha tomado del medio ambiente lo necesario para su sobrevivencia, manteniendo siempre un equilibrio entre los recursos obtenidos, evitando poner en riesgo la capacidad de autorregulación de los ciclos naturales que rigen el ambiente. Sin embargo, a partir del siglo XX y gracias a la rápida industrialización y acelerado desarrollo tecnológico, la humanidad ha llevado al medio ambiente a un punto donde pelagra su equilibrio y su capacidad de seguir proporcionando bienes naturales, de los que el mismo ser humano se ha beneficiado.

La degradación del medioambiente se manifiesta con la escasez de agua, la contaminación de los océanos, la extinción de animales y plantas; a esto se suma la deforestación, el calentamiento global y el cambio climático. Siendo estos, indicadores de una problemática que está afectando a toda la humanidad. En esta problemática los países desarrollados y los que están en vías de desarrollo son igualmente afectados (Díaz, 2012).

2.1.1 Ecosistema y servicios ambientales

Para mantener la vida y tener la capacidad de reproducirse, los organismos utilizan energía, agua y nutrientes. Las plantas obtienen agua y nutrientes principalmente de los suelos, los animales utilizan los cuerpos de agua y obtienen los nutrientes de los alimentos, los microorganismos son más versátiles al poder obtener sus nutrientes de todas las fuentes ya mencionadas. Los organismos interactúan los unos con los otros de diferentes maneras, como competidores, predadores y parásitos, además de facilitadores como lo es la polinización, dispersión de semillas y la provisión de hábitat. Estos vínculos fundamentales entre los organismos y su ambiente físico y biológico constituyen un interactivo y siempre cambiante sistema llamado ecosistema. El ser humano es un componente de este ecosistema, que depende de las propiedades y la

red de interacciones de los organismos dentro y entre los ecosistemas para su permanencia, como cualquier otra especie (Watson, 2003), estos bienes que el humano toma del ecosistema para su beneficio se conocen como servicios ambientales.

Los servicios ambientales o ecosistémicos son los beneficios intangibles que los diferentes ecosistemas ponen a disposición del ser humano, ya sea de manera natural o por medio de su manejo sustentable. En consecuencia, la base de los servicios ambientales se halla en los componentes y procesos que integran los ecosistemas (SEMARNAT 2007).

Los servicios ambientales se clasifican en cuatro categorías, los cuales son: provisión, regulación, soporte y cultural. El servicio ambiental de provisión son los productos obtenidos de los ecosistemas, como lo son los alimentos o medicinas. El servicio de regulación son los beneficios que se tiene por el buen funcionamiento de los ecosistemas, tales como la polinización, la regulación de humedad, clima y enfermedades. El servicio de soporte es la base necesaria para la producción de los otros servicios de los ecosistemas, un ejemplo es el ciclo de los nutrientes o del agua. Los servicios culturales son los beneficios no materiales que se obtienen del ecosistema, como lo es la recreación, patrimonio cultural o la estética (Comerford y Nicholas, 2013).

En la actualidad, ante el acelerado deterioro del ambiente y gracias a un mayor entendimiento de las redes de la vida y de los beneficios que los ecosistemas y sus funciones representan para la sociedad, se ha planteado la necesidad de buscar instrumentos que promuevan el mantenimiento a largo plazo de los servicios ambientales y que nos permitan dar un paso más hacia el tan necesario desarrollo sustentable (SEMARNAT, 2007).

El siguiente trabajo de investigación se enmarca en los esfuerzos para mitigar los problemas medioambientales derivados del uso irracional de los recursos naturales, específicamente los suelos que han sido alterados por el cambio de uso de sistemas naturales a sistemas agrícolas. Se exploran los posibles beneficios que algunos

manejos de cultivos pueden proporcionar al suelo y consecuentemente se podrían mejorar los servicios ambientales al capturar carbono.

2.1.2 Impacto ambiental Antropogénico

A pesar que el planeta tierra ha sido modificado por condiciones naturales a lo largo de su existencia con fenómenos naturales como sismos, erupciones volcánicas, erosión eólica e hídrica, entre otros, la civilización humana ha modificado, y en muchos casos de manera substancial, el paisaje terrestre. En las zonas en las que el hombre habita, así como donde se obtiene el alimento, han alterado los ecosistemas originales (SEMARNAT, 2007).

El hombre se ha beneficiado de los recursos naturales del planeta, tomando una serie de elementos para cubrir sus necesidades básicas, tales como; agua, aire, animales y vegetales, suelos, materiales para protegerse del clima, medios para la generación de energía y combustibles, entre otros. Lo anterior hace evidente la dependiente relación del hombre con el medio ambiente.

El desarrollo industrial que el hombre implementó en el siglo XX propició un acelerado aumento en la explotación de los recursos naturales. La cantidad y la velocidad con que se obtienen los recursos naturales se elevaron con el uso de máquinas de combustión y el uso de energía que proporciona el petróleo; esto trajo como consecuencia una enorme alteración de la naturaleza. El uso del petróleo, como combustible, arroja una gran cantidad de sustancias tóxicas al ambiente, el cual es incapaz de degradarlas naturalmente en corto tiempo. La contaminación ha sido provocada, por el crecimiento industrial desordenado y el aumento de la población humana, que se han dado sin considerar las posibilidades de la naturaleza para asimilar la gran cantidad de productos desechados (PNUMA, 2003).

Actualmente, los múltiples efectos de la presencia de la actividad del hombre sobre el planeta, en un curso relativamente breve de la historia de la humanidad, tienden a ser

dinámicos y están entrelazados de manera tal que es preciso clasificarlos para poder distinguir los factores espaciales de los temporales (FAO, 2002).

Entre los principales daños que el hombre ha realizado al medio ambiente PNUMA (2003) menciona los siguientes:

- La pérdida de la capa de ozono, que es una capa muy fina que protege al planeta de rayos UV provenientes del sol. Al destruirla se pierde esta protección, resultando en daños al ser humano y los ecosistemas.

- Envenenamiento con nitrógeno, se produce por el uso de fertilizantes con alto contenido de nitrógeno, pues altera el crecimiento y la composición de las especies y modifica la diversidad de las mismas.

- Escasez y contaminación del agua, la tendencia de los estados es básicamente extraer y distribuir el agua, pero hace muy poco para proteger cuencas, mantos acuíferos, ríos y lagos.

- La contaminación del aire, es un problema ligado a las zonas urbanas e industriales, sustentado por el número creciente de vehículos y la contaminación por industrias.

- Desechos sólidos, cada día se producen toneladas de desechos sólidos y la gran mayoría van a parar a vertederos a cielo.

El cambio climático, este se refleja en el cambio de los patrones del comportamiento climático, este problema es causado por el aumento de la temperatura consecuencia de la liberación de gases de efecto invernadero, que son el resultado de la quema de combustibles fósiles.

- La deforestación, la causa principal de esta disminución de territorio forestal es sobre todo por la expansión de tierras agrícolas.

- La erosión del suelo está ligada a la deforestación, este suelo, al estar expuesto no retiene la humedad dejando de realimenta las fuentes freáticas, además que pierde nutrientes.

El cambio climático es uno de los más evidentes problemas en el que el hombre está involucrado por la influencia que provoca principalmente la actividad industrial. El sistema climático depende del equilibrio de varios factores externos e internos. Entre los externos destacan la radiación solar o los ciclos de la órbita, mientras que algunos factores internos son la composición química de la atmósfera o los ciclos del agua y el carbono (ENCC, 2013).

A este último problema se le ha dado un gran interés por parte de la comunidad científica, se han realizando esfuerzos por entender y revertir las causas del aumento de la temperatura del planeta. El efecto invernadero, el cual es el fenómeno causante del calentamiento global, y los gases de efecto invernadero (GEI) son responsables de este efecto, son aspectos básicos para el entendimiento y posible mitigación de este problema.

2.1.3 Calentamiento global, efecto invernadero y gases de efecto invernadero

El llamado “Efecto Invernadero” es un fenómeno natural por el que gases como el CO₂, Metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), que se encuentran en la atmósfera de manera natural, permiten parcialmente el paso de las radiaciones solares al planeta, una parte de estas son reflejadas por la superficie de la tierra, dirigiéndose hacia el espacio. Sin embargo, los mismos gases impiden la salida de toda la radiación reflejada; formando así un envoltorio natural, sin el cual la temperatura media de la tierra sería unos 30 grados inferior a la actual (Saura 2003). Este fenómeno ha permitido mantener la vida en el planeta, pues la vida en la tierra debe su existencia al efecto invernadero. Las grandes cantidades de gases presentes en la atmósfera de la tierra, de la cual el CO₂ constituía una tercera parte, mantuvieron la temperatura dentro de los límites tolerables, que permitieron que la vida floreciera (Erikson, 1994).

Dentro de los diferentes GEI, destacan aquellos que son el resultado directo de la actividad humana, estos son el metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), gases fluorados y principalmente el Dióxido de Carbono (CO₂). Este último es el que en mayor cantidad se

genera por la actividad del hombre y al que más atención por parte de la comunidad científica se le ha dado.

El Departamento de Energía de los Estados Unidos de Norteamérica, tiene desde 1959 el Programa de Medición de CO₂, el cual es patrocinado por la NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration), en este programa se mide diariamente en el observatorio Mauna Loa ubicado en Hawaii las concentraciones de Bióxido de Carbono. En 1959 se tenía una concentración promedio de 315.97 ppm y para 2015 se tiene una concentración de 401.52 ppm, en la figura 2.1 se aprecia el incremento de este gas durante los últimos 55 años (SCRIPPS CO₂ PROGRAM, 2015):

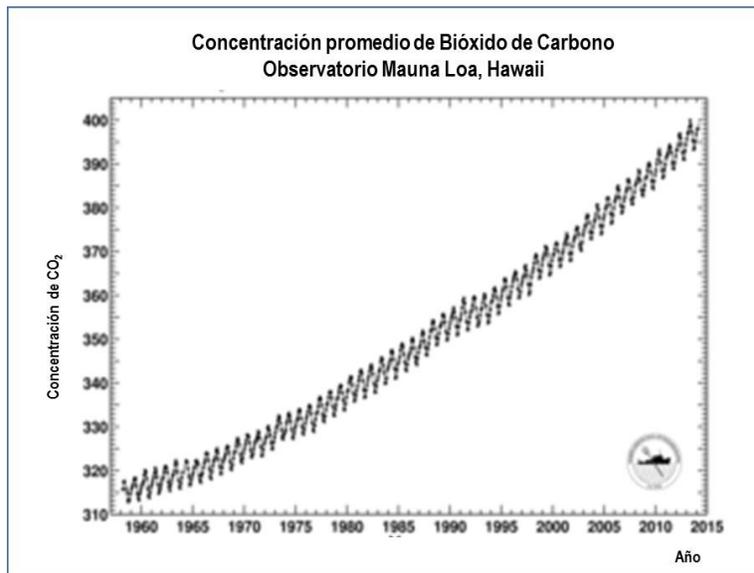


Figura 2.1. Aumento de los niveles de CO₂ atmosférico desde 1959 hasta 2015.

Existen evidencias que las emisiones de GEI durante el siglo XX están relacionadas con un incremento medio de la temperatura de 0.6 C. (IPCC, 2001; Duarte, 2006). Este aumento de temperatura se le ha denominado calentamiento global y responde a un comportamiento influenciado totalmente por el hombre.

La concentración de CO₂ en la atmósfera se encuentra alrededor de un 40% por encima de los valores medios registrados en el último medio millón de años. Lo anterior tiene como consecuencia el incremento en la temperatura promedio del planeta, la cual podría llegar o inclusive sobrepasar los 4°C hacia finales de siglo. De ser así, la sociedad enfrentaría muy graves consecuencias ambientales, económicas y sociales. Es por ello que se vive un momento crucial para emprender acciones que minimicen el agravamiento y los impactos del cambio climático.

Entre los posibles efectos que tendría un aumento de la temperatura media superficial por encima de 3°C, respecto a los niveles preindustriales, están los cambios en la frecuencia de eventos extremos de clima tales como las sequías y las ondas de calor. Además, podrían cambiar los patrones oceánicos, lo que a su vez incrementaría la intensidad de los huracanes (ENCC, 2013).

Estas posibles consecuencias por la alteración del medio ambiente han preocupado a la comunidad internacional y remarcan la importancia del ecosistema para el hombre. Esto hace evidente la dependencia del hombre con el ecosistema y de los servicios que este le brinda. Por tal motivo es de suma importancia para el hombre mejorar la calidad del medio ambiente a través de un manejo más responsable de sus actividades, con lo cual pueda obtener mejores servicios ambientales.

2.2 Acciones para la mitigación de CO₂

El problema del calentamiento global supone consecuencias más allá del ámbito meramente ambiental, no solo supone una amenaza para millones de personas sino también pone en tela de juicio los esquemas de producción y consumo que han sido modelo de países desarrollados para los subdesarrollados. Aunque la comunidad científica ha puesto atención a la elevada cantidad de CO₂ en la atmósfera desde los años setenta, la lucha contra este fenómeno se ha materializado desde la perspectiva jurídica en los años noventa, en dos tratados internacionales de vocación universal: la

Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático y el Protocolo de Kioto (Saura, 2003).

2.2.1 Antecedentes

A principios del siglo XIX fue cuando la comunidad científica tuvo indicios sobre el efecto invernadero y los cambios que este había generado. En los años 60's, se inicia la concienciación formal de los cambio en el medio ambiente, culminando con la primera gran reunión internacional sobre el medio ambiente en Estocolmo, Suecia en 1972. En esta reunión la comunidad internacional manifestó su creciente preocupación por el cambio climático. Esta fue la primera de un conjunto de reuniones internacionales que se fueron celebrando con el objeto de analizar el tema y llevar a los acuerdos que hoy día permiten hacer frente al fenómeno.

Dentro del marco de la reunión de Río de Janeiro de 1992, llamada Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, considerada como la mayor de las reuniones internacionales habidas hasta el momento, por haber convocado a representantes de más de 170 países y altas instituciones, y haber reunido simultáneamente a más de 120 jefes de Estado y de Gobierno de todo el mundo, se firma la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

2.2.2 Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático

En 1988 se crea el grupo intergubernamental sobre el cambio climático (IPCC por sus siglas en ingles), esto a iniciativa de la Organización Meteorológica Mundial y el programa de las Naciones Unidas Para el Medio Ambiente. Para el 1990 se emitió un primer informe donde se afirmaba que el calentamiento atmosférico del planeta era real y se instaba a la comunidad internacional a tomar acciones para evitar este problema (CMCC, 2014).

Ante la problemática planteada por el IPCC se llegó a un acuerdo por la comunidad internacional, listo para firmarse en 1992, en ocasión de la celebración de la Cumbre de la Tierra en Río de Janeiro, Brasil.

Los principales acuerdos de la celebración de la cumbre de la tierra fueron:

- a) La Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo o Carta de la Tierra.
- b) La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.
- c) El Convenio sobre la Diversidad Biológica.
- d) El Programa 21, Llamado así porque marca el camino para llegar al siglo XXI en condiciones ambientales y de desarrollo sostenibles.

La “Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático”, fue adoptada en Nueva York el 9 de mayo de 1992 y entró en vigor el 21 de marzo de 1994.

Este instrumento tiene como objetivo principal evitar la interferencia peligrosa que pueda tener el ser humano en el sistema climático, para esto se establecen los compromisos por país frente al cambio climático. La convención deja la mayor responsabilidad en la lucha contra el cambio climático a los países industrializados, pues históricamente son los que más contribuyen con la emisión de los GEI (CMCC, 2014).

En esta Convención, los países desarrollados se incorporaron al documento conocido como “Anexo I” y los países en desarrollo al “Anexo II”.

La Convención establece compromisos de reducción de emisiones únicamente para los países Anexo I. Los niveles asignados de reducción de GEI varían de país a país, pero en general, la comisión establece que los países desarrollados disminuyan sus emisiones en 5% con respecto a los niveles de 1990. Los países en desarrollo como México no tienen compromisos de reducción de emisiones, sus compromisos ante la Convención son: el desarrollo de inventarios de GEI y la publicación de Comunicaciones Nacionales (INECC, 2014). No obstante, pese a que aprobaron la

Convención, los gobiernos eran conscientes de que sus disposiciones no bastarían para procurar la debida solución al cambio climático.

En la primera Conferencia de las Partes, celebrada en Berlín (Alemania) a principios de 1995, se inició una nueva ronda de negociaciones para analizar compromisos más firmes y específicos. Como resultado de la Conferencia de las Partes se instauró el Mandato de Berlín, que buscaba el establecimiento de objetivos cuantitativos de reducción de emisiones de todos los gases de efecto invernadero en periodos específicos de tiempo, tales como 2005, 2010 y 2020. Al cabo de dos años y medio de intensas negociaciones, en diciembre de 1997 se aprobó en Kioto (Japón) un anexo importante de la Convención, el denominado protocolo de Kioto.

2.2.3 Protocolo de Kioto

El Protocolo de Kioto estableció metas obligatorias para los países industrializados en relación con las emisiones y creó mecanismos innovadores para ayudar a estos países a cumplir esas metas. El Protocolo de Kioto entró en vigor el 18 de noviembre de 2004, después de su ratificación por 55 Partes en la Convención, entre ellas un número suficiente de países industrializados, actualmente se tienen 193 ratificaciones.

La idea central de este tratado es la de una responsabilidad común pero reconociendo las diferencias de cada país. Basándose en los principios de la convención, este protocolo compromete a los países industrializados a estabilizar sus emisiones de GEI para el periodo de 2008-2012. Establece metas vinculantes para las reducciones de GEI a 37 países industrializados y de la Unión Europea, adjudicándoles la principal responsabilidad de la gran cantidad de emisión de GEI que existe actualmente, resultado de la quema de combustibles fósiles durante más de 150 años (CMCC, 2014).

La Convención obliga a todas las Partes a poner en práctica programas y medidas nacionales para controlar las emisiones de gases de efecto invernadero y adaptarse a los efectos del cambio climático. Las Partes también se comprometen a promover el desarrollo y la utilización de tecnologías que no perjudiquen al clima; a educar y

sensibilizar al público acerca del cambio climático y sus efectos; a explotar los bosques y otros ecosistemas de manera sostenible para que puedan eliminarse los gases de efecto invernadero de la atmósfera y a cooperar con las demás Partes en estas actividades.

Los compromisos de reducción de emisiones para los países desarrollados, los cuales se enuncian en su artículo 3 son:

-Las Partes incluidas en el Anexo I (países en desarrollo) se asegurarán, individual o conjuntamente, de que sus emisiones de GEI de origen humano no excedan de las cantidades permitidas a ellas en función de sus compromisos de reducción de emisiones. Lo anterior, con miras a reducir el total de las emisiones de esos gases a un nivel inferior en no menos de 5%, de las emisiones reportadas en 1990, en el período de compromiso comprendido entre el año 2008 y el 2012.

-Cada una de las Partes incluidas en el Anexo I deberá poder demostrar para el año 2005 un avance concreto en el cumplimiento de sus compromisos contraídos en virtud del presente Protocolo (INECC, 2014).

En 2006, ante la necesidad de mejorar algunos aspectos del protocolo, se enmendó en Nairobi este Protocolo a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático y se tenía previsto adoptar un nuevo protocolo en el año 2009 en Copenhague, lo cual se tuvo que retrasar y mover a México en el 2010.

Los Acuerdos de Cancún son un conjunto de decisiones importantes tomadas por la comunidad internacional para hacer frente al reto a largo plazo del cambio climático de manera colectiva y completa en el futuro, y para tomar ahora medidas concretas con el fin de acelerar la respuesta mundial. Los acuerdos, alcanzados el 11 de diciembre de 2010 en Cancún, México, durante la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, suponen pasos cruciales hacia planes oficiales de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y de ayuda a las naciones en desarrollo para que se protejan de los impactos del cambio climático y construyan sus propios futuros sostenibles.

Para el cumplimiento de estos objetivos el protocolo de Kioto ofrece una serie de acciones denominadas mecanismos flexibles, las cuales están enfocadas para lograr la reducción del CO₂ producido por el hombre.

2.2.3.1 Mecanismos flexibles

Los mecanismos flexibles, son tres mecanismos de acción que sirven para cumplir con los compromisos establecidos para los países Anexo I dentro del protocolo de Kioto, los cuales son:

- Implementación conjunta
- Mecanismo de Desarrollo Limpio
- Comercio de emisiones

El propósito del mecanismo para un desarrollo limpio es ayudar a las partes no incluidas en el anexo I a lograr un desarrollo sostenible y contribuir al objetivo último de la Convención, así como ayudar a las Partes incluidas en el anexo I a dar cumplimiento a sus compromisos cuantificados de limitación y reducción de las emisiones de GEI, contraídos en virtud del artículo antes mencionado, aumentando sus sumideros de carbono de una manera más económica. Aunque el costo de limitar emisiones o expandir la captura varía mucho entre las regiones, el efecto en la atmósfera es el mismo, sin importar donde se lleven a cabo dichas acciones (ONU, 1998).

Los mecanismos flexibles se describen a continuación:

1- Implementación conjunta: definido en el artículo 6 del Protocolo de Kioto, permite que un país que se haya comprometido a reducir o limitar sus emisiones de GEI, gane unidades de reducción de emisiones generadas en un proyecto de reducción o eliminación de estas en otro país. Cada unidad de reducción equivale a una tonelada de CO₂ capturado, que cuenta para el logro de su meta en base al tratado de Kioto. Esta dinámica ofrece a las partes un medio flexible y rentable de cumplir los compromisos

adquiridos, a la par que el país donde se lleva a cabo el proyecto se beneficia de la inversión extranjera y la transferencia de tecnología (CMCC, 2014).

2- Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL): El Artículo 12 funciona de manera similar al de Instrumentación Conjunta, a diferencia que las Partes no Anexo I serán los huéspedes de proyectos de mitigación. La estructura institucional del MDL es más compleja ya que incluye un Consejo Ejecutivo que guiará y supervisará los arreglos prácticos del MDL. El Consejo opera bajo la autoridad de la Conferencia de las Partes. Los procesos de monitoreo son más estrictos para garantizar que no se generen Certificados de Reducción de Emisiones ficticios, dado que algunos países en desarrollo carecen de la capacidad técnica necesaria para realizar un monitoreo preciso de sus emisiones. Las Unidades de Remoción son las que se obtienen de las actividades de captura de carbono (CMCC, 2014).

Este es el primer plan mundial de inversión y crédito ambiental de su clase. Un ejemplo de este tipo de proyecto puede consistir en la electrificación de cierta área con paneles solares o la instalación de laderas de menos consumo. El mecanismo fomenta el desarrollo sostenible al mismo tiempo que ofrece opciones a los países industrializados para elegir la forma en que quiere alcanzar sus metas de reducción de emisiones (CMCC, 2014).

El Mecanismo para el Desarrollo Limpio es el esquema más importante para los países emergentes, México entre ellos. Este mecanismo tiene el propósito de ayudar a las partes no incluidas en el Anexo I a lograr un desarrollo sustentable y contribuir al objetivo último de la Convención, así como ayudar a las partes incluidas en el Anexo I a dar cumplimiento a sus compromisos cuantificados de limitación y reducción de emisiones contraídos en virtud del artículo 3. De tal forma, los países en desarrollo pueden vender un servicio ambiental global (INECC, 2014). Dicho de otra forma los MDL consisten en incentivar, a través de un pago por el servicio, proyectos dirigidos a la producción de biomasa en sus diferentes variables (cultivos y bosques principalmente), con el fin de captar carbono de la atmósfera y fijarlo en esta biomasa y en suelos. La idea es que los países desarrollados compren el derecho de contaminar por el proceso de su industria a través de los proyectos captadores del CO₂. La compra

debe ser equitativa entre la cantidad de CO₂ producida y la biomasa acreditada (INECC, 2014).

3- Comercio de emisiones: Tal como se dice en el artículo 17 de Kioto, permite que los países que tengan unidades de emisión de sobra, vendan ese exceso de capacidad a países que sobrepasan sus metas. Con esto se creó un nuevo producto básico en forma de reducción o eliminación de emisiones, se conoce simplemente como comercio de carbono por el hecho de que el CO₂ es el principal GEI. Las actividades del comercio de emisiones serán suplementarias a las medidas nacionales que se adopten para cumplir los compromisos cuantitativos de limitación y reducción de emisiones (CMCC, 2014).

Con los denominados mecanismos flexibles se pretende contribuir a que las soluciones técnicas para cumplir con los objetivos de Kioto sean costo-efectivas mediante esquemas de mercado. De las acciones anteriores se destacan los MDL por integrar a los países en vías de desarrollo para ser anfitriones de proyectos de sumideros de carbono.

2.2.4 México ante el cambio climático

México firma el Protocolo de Kioto el 9 de junio de 1998 y lo ratifica el 7 de septiembre de 2000, y queda excluido del anexo I, situación que le provoca a México presiones en el ámbito internacional debido a los compromisos adquiridos.

Por sus características geográficas, México se encuentra expuesto a fenómenos como huracanes, sequías, temperaturas extremas y lluvias torrenciales. Por tal motivo México es uno de los países que ha colocado como punto primordial de su agenda la creación e implementación de respuestas a este fenómeno, tanto para mitigar sus emisiones de gases de efecto invernadero, como para reducir las consecuencias de sus impactos negativos, así como aprovechar las posibles oportunidades que las transformaciones en el clima pudieran presentar (SEMARNAT, 2012).

2.2.4.1 Emisión de gases de efecto invernadero y participación de México en los mecanismos de desarrollo limpio

México se encuentra en un lugar intermedio entre los emisores de carbono a nivel mundial, ocupando el lugar 14 entre los países con más emisiones de GEI. Su contribución es actualmente cerca del 1.5% de las emisiones mundiales. México es el primer lugar de emisiones en América Latina, con cerca del 25% del total de emisiones de esta región (Salazar y Macera, 2010).

La contribución en 2002 de las emisiones de los GEI por parte de México fue de 643 millones de toneladas en términos de CO₂ equivalente (INE, 2006), lo cual representa un aumento de 25% con respecto al año base de 1990. Las emisiones de GEI por tipo de gas se dividen de la manera siguiente: 74% de dióxido de carbono (CO₂), proviniendo principalmente de la generación de energía, transporte, industria y cambio de uso de suelo; 23% metano (CH₄), proviniendo principalmente del sector petrolero, agricultura y deshechos; 2% de óxido nitroso (N₂O); el restante 1% se compone de flouorocarbonados (Salazar y macera, 2010).

Actualmente y según datos del Banco Mundial, México ha bajado sus emisiones per cápita del año 2007 al 2010, la emisión per cápita de CO₂ para 2007 fue de 4 toneladas y para el año 2010 fue de 3.76, de la misma manera la emisión de México como país ha visto una disminución de 2007 a 2010, pues sus emisiones en 2007 fueron de 456 Mt contra 443.6 Mt emitidas en el año 2010 (Banco Mundial, 2014).

Las acciones políticas de México ante el cambio global no se han hecho esperar, en mayo de 2007 se presentó la Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENACC); esta estrategia colocó al cambio climático en el centro de la política nacional de desarrollo del país. La ENACC estableció un primer esbozo de plan de acción de largo plazo sobre el cambio climático para México, así como las metas de mediano y largo plazo relacionadas con las medidas de adaptación y mitigación. En agosto de 2009, México publicó el Programa Especial de Cambio Climático (PECC). De igual modo que con

todos los programas gubernamentales, el PECC se considera parte del Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012 (PND), (Banco Mundial, 2009).

En junio de 2012 entra en vigor la Ley General de Cambio Climático, y dentro de sus objetivos se encuentra el de “Regular las emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero para lograr la estabilización de sus concentraciones en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático considerando en su caso, lo previsto por el artículo 2o. de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y demás disposiciones derivadas de la misma”; así como “Regular las acciones para la mitigación y adaptación al cambio climático”

En octubre de 2014 se expide el Reglamento de la Ley General de Cambio Climático en Materia del Registro Nacional de Emisiones, y tiene por objeto reglamentar la Ley en lo que se refiere al Registro Nacional de Emisiones. En este reglamento se consideran las emisiones en el Sector Agropecuario y para el Subsector agricultura se ha incorporado: el cultivo de oleaginosas, gramíneas, leguminosas o cereales, tanto en grano como forrajeras; el cultivo de hortalizas; el cultivo de frutales y nueces, y el cultivo en invernaderos y viveros y floricultura.

Las actividades agrupadas en el sector agropecuario, calcularán y reportarán sus Emisiones considerando todas las instalaciones, sucursales, locales, lugares donde se almacenen mercancías y en general cualquier local, instalación o sitio que utilicen para el desempeño de sus actividades.

En este mismo reglamento en el artículo 5 se indican los Gases o Compuestos de Efecto Invernadero sujetos a reporte en los términos del presente Reglamento, en donde se incorpora en primer lugar al Bióxido de Carbono.

México se encuentra en una posición privilegiada ante las acciones propuestas por el protocolo de Kioto, para aprovechar los mecanismos que se han instrumentado a nivel internacional para reducir la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera. México presenta la segunda tasa de crecimiento de emisiones de Bióxido de Carbono, como producto de la quema de combustibles fósiles, dentro de los países de la OCDE.

Mientras que la tasa de crecimiento promedio de la OECD es de 0.3%, México presenta una tasa de 1.1% anual (SENER, 2010).

A partir del 2004 en México se puso en marcha un acuerdo en el que se establecen las reglas de operación para el otorgamiento de pagos del programa para desarrollar el mercado de servicios ambientales por captura de carbono y los derivados de la biodiversidad, y para fomentar el establecimiento y mejoramiento de ecosistemas forestales y sistemas agroforestales. La finalidad es realizar una evaluación eficiente y objetiva de las solicitudes para la elaboración de estudios y la ejecución de proyectos de captura de carbono y reducción de emisiones. Por ello establece términos de referencia para la elaboración de proyectos de captura de carbono y reducción de emisiones, así como los términos de referencia para la ejecución de tales proyectos (Ordoñez, 2008).

En marzo de 2009, había 1,435 proyectos registrados ante dicho organismo, lo que representa que para el año 2012 serían remitidas más de 1,480 millones de toneladas de CO₂. Dentro de estos proyectos, México es el cuarto país en contribución a nivel global con 112 proyectos, es decir, el 7.8%, después de China 440 (30.66%), India 397 (27.67%), y Brasil 150 (10.45%) (SENER, 2009).

La captura y secuestro de Bióxido de Carbono en México se ha centrado principalmente en el área forestal, que a través del organismo CONAFOR ha implementado un programa de pago de servicios ambientales cuyos principales componentes son el secuestro de Bióxido de Carbono por bosques para mitigar el cambio climático, conservación d la biodiversidad y la conversión de pastizales y agricultura a sistemas agroforestales.

2.3 Captura de carbono

Existe un fuerte interés por estabilizar la abundancia de CO₂ Antropogénico y otros GEI para reducir los riesgos del calentamiento global. Entre las diferentes estrategias, existen tres que se destacan para reducir las emisiones de CO₂: 1) reducir el uso global

de energía, 2) desarrollar combustible bajo o cero carbono y 3) el secuestro de carbono, ya sea desde el punto de emisión o de la atmosfera (Schrag, 2007).

La captura de carbono es el proceso en el cual el CO₂ atmosférico es tomado y almacenado en depósitos de carbono donde permanecerá por tiempo prolongado, que de otra manera sería emitido a la atmosfera. La captura de carbono puede ser natural o por procesos antropogénicos, dicho de otra manera, se puede diferenciar como biótica y abiótica (Figura 2.2). Los sumideros de carbono es donde el carbono capturado es almacenado, para el caso de la captura de carbono biótico, es la transferencia del CO₂ atmosférico, llevado a depósitos bióticos y edafológicos (Lal, 2007).

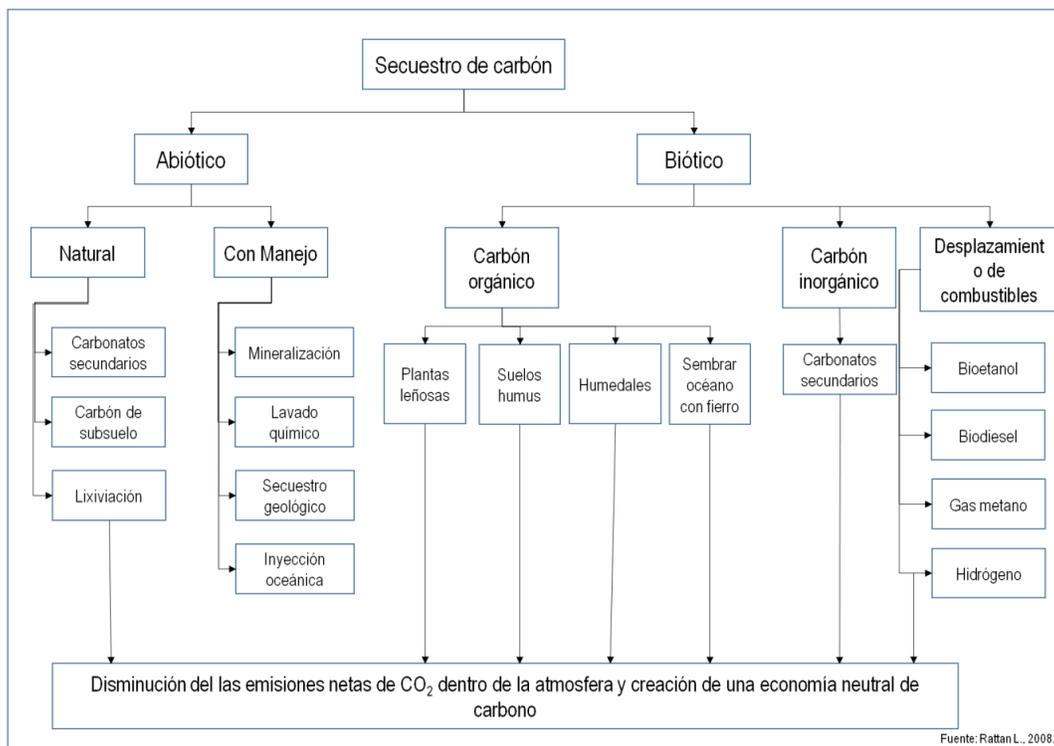


Figura 2.2. Diagrama de los diferentes escenarios para la captura de carbono (Lal, 2008).

2.3.1 Ciclo de carbono y sumidero de carbono

El ciclo natural del carbono consiste en la dinámica del intercambio de este en sus diferentes etapas. El ciclo del carbono se desarrolla y está presente en diferentes zonas del planeta siendo así en los mares, la atmosfera y la zona terrestre (Figura 2.3). En la zona terrestre, el ciclo del carbono se refleja en un principio con la producción de biomasa. La vegetación, a través de la fotosíntesis, fija el CO₂ atmosférico y lo convierte en carbohidratos que sirven para desarrollo y estructura a las plantas, durante este proceso también es liberado CO₂ debido a la respiración de las plantas. El carbono se encuentra almacenado en la planta hasta que es consumida por animales o muere y se descompone, en cualquiera de los casos, una parte del carbono pasa al suelo ya sea a través de la raíz de la planta, con la acumulación de vegetación muerta sobre el suelo o con la muerte de los animales que continúan con la cadena trófica. Parte de la contribución de carbono en suelo también la realiza la actividad metabólica de los microorganismos presentes en los suelos. Entender el ciclo global del carbono y su perturbación por las actividades antropogénicas es importante para el desarrollo de estrategias viables para la mitigación del cambio climático (Lal, 2007).

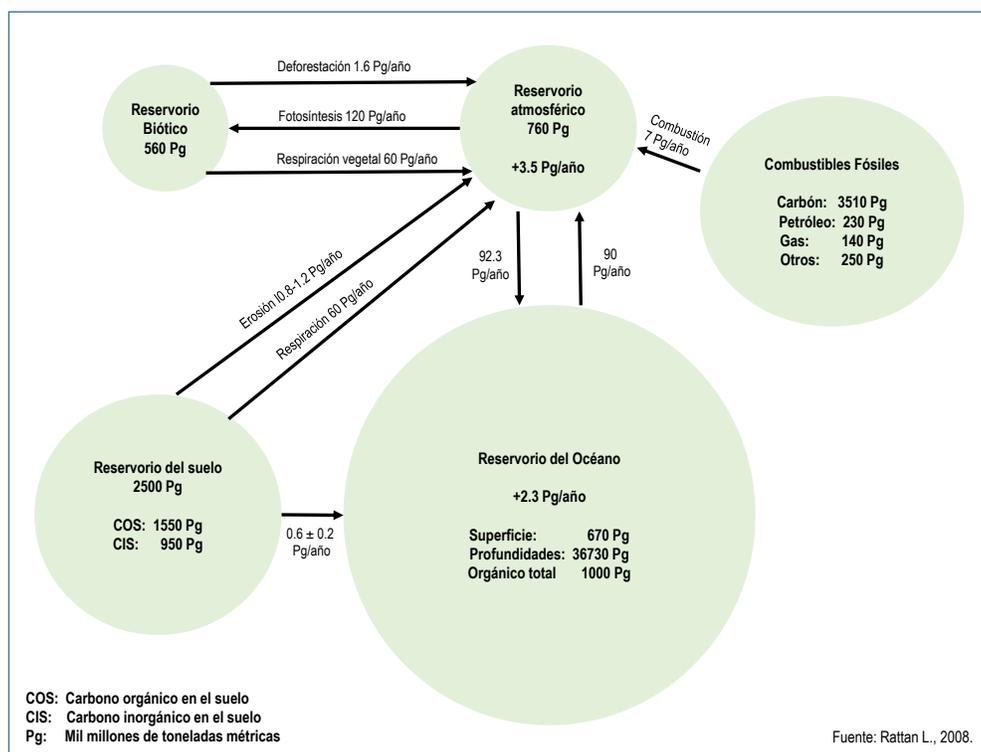


Figura 2.3. Niveles de carbono orgánico en sus diferentes estadios en el planeta (Lal 2008).

2.3.2 Captura de carbono en plantas y suelos

La vegetación es la principal captadora de carbono de manera natural a nivel terrestre, sin embargo, solo para cierto tipo de vegetación se considera que la captura es relevante, pues lo que se busca es que el carbono capturado no regrese al ciclo del carbono rápidamente. La producción maderable es la que mayor atención se pone para este fin, pues la madera, ya sea en el árbol vivo o como ya un objeto procesado, se considera que es carbono capturado. En este caso el carbono es liberado hasta que la madera se descompone o es quemada. Las plantas no maderables, cuentan con un ciclo de vida más rápido por lo que gran parte del carbono rápidamente regresa la atmosfera.

En suelos, el carbono que se captura es almacenado en forma de materia orgánica. El carbono se almacena en suelos principalmente por las biomasa que muere sobre este y raíces de los árboles, gracias a la actividad de los microorganismos descomponedores que los residuos vegetales y animales que se encuentran sobre el suelo y en raíz son descompuestos en elementos más sencillos, pudiendo infiltrarse a través de la tierra y llegando a depositarse a diferente profundidad, según el tipo de vegetación (Kirschbaum, 2000). La materia orgánica que depositada en el suelo se encuentra en diferentes etapas de descomposición, por lo que es difícil determinar el estado específico de la materia orgánica de un suelo. Sin embargo, se sabe que la relación del carbono que se almacena en suelo es aproximadamente de dos quintas partes de la materia orgánica que cae al suelo, la otra parte regresa al ciclo del carbono en forma de CO₂. El secuestro de carbono generalmente se refiere a un almacenaje a un medio-largo plazo, entre 15 y 50 años de almacenaje para los ecosistemas terrestres (Kuan, 2004).

Capítulo 3 Suelos y sus servicios ambientales

Es ampliamente reconocido que el suelo constituye un ecosistema terrestre primario que sirve como medio de soporte, reciclaje y limpieza de desperdicios de plantas y animales, y de los posibles agentes patógenos y tóxicos resultantes que podrían envenenar el ambiente (Rosenzweig, 2000). El buen funcionamiento del suelo y los demás ecosistemas, garantizan la generación de bienes naturales de los cuales el hombre se beneficia. Estos bienes son conocidos como servicios ambientales y se definen como “las condiciones y procesos a través de las cuales los ecosistemas naturales, y la especies que los componen, mantienen y suministran a la vida humana (Zhang, 2007).

Entre los servicios ambientales suministrados por el suelo, el ciclo de nutrientes y el secuestro de carbono influyen directamente en los ciclos biogeoquímicos y la emisión de gases de efecto invernadero que afectan la disposición de otros servicios ambientales que sustentan la existencia humana (Ghaley, 2014). Se sabe que los suelos son el segundo mayor sumidero de carbono (tercero si se cuentan las yacimientos de petróleo, gas y carbón), se estima que almacenan un aproximado de 2500 Gt hasta el primer metro de profundidad (Lal, 2008).

3.1 Características y tipos de suelos

En base a la definición del departamento de agricultura de los Estados Unidos, el suelo es un cuerpo natural compuesto de sólidos (minerales y materia orgánica), líquidos y gases que se produce en la superficie de la tierra, ocupa un espacio y se caracteriza por uno o ambos de los siguientes aspectos:

-Cuenta con horizontes o capas, las cuales se distinguen a partir de un material inicial, y aparecen como consecuencia de adición, y

-Pérdida, transferencia y transformación de materia y energía, o la habilidad para mantener plantas enraizadas dentro de un ambiente natural.

El límite superior del suelo es la frontera entre el este y el aire, aguas poco profundas, plantas vivas o material vegetal que no ha empezado a descomponerse. Si las áreas están cubiertas permanentemente por aguas profundas (más de 2.5 m), no se considera suelo.

La frontera inferior que separa al suelo de lo considerado como no suelo es más difícil de definir; el suelo consiste en horizontes cercanos a la superficie de la tierra que, en contraste con el material parental, ha sido alterado por la interacción del clima, relieve y los organismos vivos a través del tiempo. Comúnmente el límite inferior del suelo es donde se encuentran rocas duras o materiales terrosos prácticamente desprovistos de animales, raíces u otros indicadores de actividad biológica. Para fines de clasificación, el límite inferior del suelo se le considera, arbitrariamente a 200 cm (USDA, 2014).

Como ya se mencionó, se lleva a cabo la interacción de diferentes factores para que la formación del suelo se realice, este proceso puede tomar miles de años para llegar a un equilibrio. Los principales factores que influyen en la formación de suelo son el clima, topografía, material parental, el tiempo y factores biológicos (plantas, animales, microorganismos y el ser humano). Diferentes combinaciones e intensidades de los factores de formación del suelo dan como resultado diferentes tipos de suelo (FAO, 2014).

Las características de la zona donde se desarrolle el suelo también determinan las diferentes características de este. Tal es el caso de los suelos desarrollados en climas tropicales húmedos, suelos orgánicos, suelos volcánicos, suelos donde la actividad humana es un factor formador o suelos jóvenes. Ejemplo de lo anterior son los suelos volcánicos, los cuales se desarrollan a partir de materiales de origen volcánico (como cenizas, piedra pómez y lava) y presentan una alta proporción de vidrio volcánico (también conocido como obsidiana), su alto contenido de iones de aluminio junto con la materia orgánica forma compuestos orgánicos-minerales estables. Otro ejemplo, más próximo son los suelos cultivados, los cuales han sufrido cambios en sus propiedades

debido a la mezcla de la capa superficial con el subsuelo a través de las labores agrícolas, lo cual puede deteriorar o mejorar el suelo (UE, 2014).

Existen una enorme cantidad de posibles combinaciones de suelos en base a sus diferentes propiedades, estos pueden agruparse en las principales clasificaciones de tipos de suelos. Sin embargo, y a manera de ofrecer una descripción práctica, FAO realiza una clasificación generalizada de los tipos de suelos en base a sus características;

- Suelos con capas orgánicas
- Suelos con alto grado de influencia humana
- Suelos con limitaciones en el crecimiento de raíces
- Suelo que se distinguen por la presencia especial de hierro y aluminio en su química
- Suelo suelos con capa vegetal oscuros y ricos en humus
- Suelos con acumulación de sales solubles
- Suelos con una presencia enriquecida de arcilla en su subsuelo
- Suelos con poco o ningún desarrollo

Existen diferentes clasificaciones taxonómicas de suelos, y el uso de cada uno dependerá según la región, país u organismo internacional. Mundialmente las clasificaciones taxonómicas más aceptadas para las referencias sobre suelos son las propuestas por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, la Sociedad Internacional de la Ciencia del suelo y la FAO. Sin embargo algunos países han realizados esfuerzos por tener su propio sistema de clasificación taxonómica (FAO^A, 2015).

A continuación, en la tabla 2.1, se muestra la clasificación de suelos de acuerdo a la Base Referencial mundial del Recurso Suelo, WRB por sus siglas en inglés, proporcionada por la FAO:

Nombre	Características
Histosoles	Suelos orgánicos
Antrosoles	Suelos formados por la influencia del hombre
Tecnosoles	
Criosoles	
Leptosoles	Suelos con laminación severa para enraizamiento
Vertisoles	
Fluvisoles	
Solonetz	Suelos que están o han estado fuertemente influenciados por el agua
Solonchaks	
Gleysoles	
Andosoles	
Podsoles	
Plintosoles	La química del hierro y/o aluminio forman un papel importante en su formación.
Nitrosiles	
Ferralsoles	
Planosoles	
Stagnosoles	Suelos con procesos hidromórficos
Chernozems	Suelos de regiones de estepas, con horizonte superficial rico en humus y alto porcentaje de saturación de bases
Kastañozems	
Phaozems	
Gipsisoles	
Durisoles	Suelos de regiones áridas con acumulación de yeso, sílice y carbonato de calcio respectivamente
Calcisoles	

Nombre	Características
Albeluvisoles	
Alisoles	
Acrisoles	Suelo con subsuelo rico en arcilla
Luvisoles	
Lixisoles	
Umbrisoles	
Arenosoles	Suelos relativamente jóvenes con muy poco o ningún desarrollo de perfil
Cambisoles	
Regosoles	

Tabla 3.1 Clasificación de los suelos de la base de referencia mundial del recurso suelo.

México ha hecho uso de la clasificación WRB, la cual fue adecuada por INEGI en el 2000. De acuerdo a esta clasificación los grupos de suelos que predominan en México son: Leptosoles (28.30%), Regosoles (13.70%), Phaeozems (11.70%), Calcisoles(10.40%), Luvisoles (9.0%) y Vertisoles (8.60%); los cuales concentran el 81.7% de la superficie total (Reyes,2014).

3.2 Servicios ambientales de los suelos

Entre las principales funciones del suelo se encuentran el reciclaje de nutrientes y el secuestro de carbono. El primero incluye la fijación de nitrógeno, adquisición de fósforo micorrizas y la descomposición y mineralización de residuos orgánicos de suelos. Por otro lado, las principales funciones de carbono en suelos son las de reservorio de nutrientes para plantas, mejora la agregación del suelo y evita la erosión, es fuente

energética para los organismos del suelo y estabiliza la emisión de GEI del suelo a la atmósfera (CEH, 2014).

A continuación se muestra una tabla donde se ejemplifica algunos de los tipos de servicios ambientales que el suelo brinda al ser humano.

Servicios ambientales del suelo
Apoyo
Soporte y estabilidad para plantas
Renovación, retención y suministro de nutrientes para plantas
Reservorio de germoplasma y hábitat
Regulación
Regulación de los principales ciclos
Amortiguamiento y regulación del ciclo biológico.
Eliminación de residuos y materia orgánica muerta
Provisión
Materiales para la construcción
Cultural
Sitios de patrimonios, preservación de sitios arqueológicos
Valor espiritual y religioso, cementerios

Tabla 2.2 Algunos los ejemplos de los servicios ambientales (CEH, 2014).

El carbono orgánico se encuentra directamente relacionado con los servicios de regulación y soporte en suelos, por lo que la presencia del carbono orgánico es un servicio ambiental fundamental para la estabilidad de los suelos (FAO, 2014).

3.3 Importancia del suelo como reservorio de carbono

Globalmente, los niveles de carbono almacenado en el suelo representan el segundo mayor reservorio, sólo después del océano (38,000 Gt). Los reservorios bióticos terrestres representan aproximadamente 560 Gt de carbono orgánico, mientras el suelo contiene alrededor 1500 Gt de carbono orgánico en el primer metro de profundidad, y solamente en los primeros 20 cm de profundidad se encuentran 615 Gt de carbono orgánico almacenado (Stockmann et al, 2012).

Dada la importancia de los suelos como reservorio de carbono y a la vulnerabilidad que presenta ante malos manejos del hombre, es de suma importancia evitar que se pierda el carbono orgánico del suelo, y evitar su estadio atmosférico en forma de CO₂. Un ejemplo de las posibles consecuencias de la disminución de carbono orgánico del suelo es planteado por Kirschbaum (2000) en donde se indica que la pérdida del 10% de carbono orgánico del suelo representaría un equivalente de 30 años de emisiones de CO₂ antropogénico, pudiendo afectar significativamente los niveles de CO₂ atmosférico.

3.4 Materia orgánica en suelos

El carbono orgánico del suelo se encuentra en la materia orgánica, la cual es una mezcla compleja que influye en propiedades y ciclo de nutrientes del suelo, esto impacta a su vez en el tipo y uso de suelo, clima y vegetación. La materia orgánica del suelo es el término utilizado para referirse a los constituyentes orgánicos del suelo y es cualquier material producido originalmente por organismos vivos el cual retorna al suelo a través del proceso de descomposición. La descomposición de la materia orgánica se lleva a cabo por medio de hongos y bacterias que produce moléculas orgánicas e inorgánicas simples que pueden a la vez ser usadas por otros organismos. En general las bacterias descomponen rápidamente el material orgánico que da lugar a nutrientes, especialmente N, P y S que quedan inmediatamente disponibles para la absorción por parte de otros organismos. Este proceso es llamado mineralización (FAO, 2005).

La mayoría de la materia orgánica se compone de tejido vegetal, el cual se compone de entre 10 y 40% de materia seca. Esta materia seca se compone de carbono, oxígeno, hidrógeno y nitrógeno, además de azufre, fósforo, potasio, calcio y magnesio, estos diferentes nutrientes son muy importantes para la fertilidad del suelo. La materia orgánica del suelo se descompone hasta dar lugar a la formación de materia orgánica más compleja llamada humus (FAO 2012).

El humus está formado por un grupo de sustancias húmicas que incluyen ácidos húmicos, ácidos fúlvicos, ácidos himatomelánicos y huminas y es, probablemente, el material orgánico que contiene carbono más difundido en los ambientes acuáticos y terrestres (Jaramillo, 2004). Una de las características más sorprendentes de las sustancias húmicas es su capacidad para interactuar con los iones de metales, óxidos e hidróxidos minerales y orgánicos, incluyendo contaminantes tóxicos, para formar asociaciones solubles e insolubles en agua. Las sustancias húmicas fortalecen el crecimiento de las plantas directamente a través de los efectos fisiológicos y nutricionales. De esta manera el ácido húmico es capaz de favorecer la germinación de las semillas, la iniciación radicular y la absorción de nutrientes de las plantas y sirve como una fuente de nitrógeno, fósforo y azufre. Indirectamente, pueden afectar el crecimiento de las plantas por medio de modificaciones de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo tales como un incremento en la capacidad de retención de agua y en la capacidad de intercambio de cationes y mejorando la capa cultivable y la aireación por medio de una buena estructura del suelo (FAO^A, 2002).

Los niveles de materia orgánica están relacionados con la capacidad del suelo para sustentar el crecimiento vegetal sobre este, los suelos con alto contenido de materia orgánica sustentan una gran biomasa vegetal sobre él. Dicha característica también es aprovechada por el hombre para la producción agrícola, procurando suelos con altos contenido de materia orgánica y, aumentando así, la productividad del cultivo.

3.5 Suelos agrícolas

Se denomina suelo agrícola a la porción del área de tierra cultivable, afectada a cultivo permanente y a pradera permanente. La tierra cultivable incluye aquellos terrenos definidos por la FAO como afectados a cultivos temporales (las zonas de doble cosecha se cuentan una sola vez), los prados temporales para segar o para pasto, las tierras cultivadas como huertos comerciales o domésticos, y las tierras temporalmente en barbecho. Se estima que el 37.7% de la superficie total de la tierra está ocupada por cultivos (Banco Mundial, 2015).

La base de la agricultura tradicional es arar el suelo, depositando la semilla en el interior de la tierra, protegiéndola de depredadores, así nació la agricultura. Sin embargo la invención de herramientas para arar el suelo permitieron la expansión de la agricultura hasta la actualidad (Lal, 2009).

El manejo de la agricultura tiene diferentes repercusiones ambientales según su manejo, en la actualidad son generalmente negativas con la agricultura industrial. Por ejemplo, de manera general el desarrollo de la agricultura ha implicado una gran pérdida de materia orgánica del suelo (FAO, 2002), Usualmente los sistemas con suelos arables contienen entre 1 y 3% de carbono a orgánica en suelo, los pastizales y bosques contienen una mayor cantidad (Jenkins, 1988). Aunque se espera encontrar diferentes comportamientos en diferentes suelos bajo diferentes concentraciones, parece ser aceptado de manera general que abajo del umbral del 2% de materia orgánica la calidad del suelo decaerá seriamente y con ello la producción agrícola (Loveland, 2003).

La agricultura y el medio ambiente se encuentran relacionados de manera bidireccional. Sin embargo, bajo ciertas condiciones de manejo, la agricultura puede tener un impacto positivo en el medio ambiente y los servicios ambientales. La agricultura y los servicios ambientales se interrelacionan al menos en tres formas: 1) los agroecosistemas generan servicios ambientales benéficos, tales como la retención de suelo, producción de comida y estética; 2) los agroecosistemas se benefician de los servicios ambientales de otros ecosistemas como la polinización; 3) los servicios ambientales de los sistemas no agrícolas pueden ser impactados por las prácticas agrícolas (Dale, 2007).

3.6 Manejo de suelos agrícolas para captura de carbono

La agricultura y su expansión se basaron en arar la tierra, esta práctica trajo diversos beneficios, sin embargo a través del tiempo se convirtió en la principal causa de la erosión del suelo. La erosión del suelo es definida como un proceso de desagregación, transporte y deposición de materiales del suelo por agentes erosivos tales como la lluvia o el viento (FAO^B, 2015). La erosión inducida por la degradación del suelo es la causa probable por las que algunas civilizaciones antiguas colapsaron, como los fenicios, mesopotámicos y mayas (Lal, 2009). Actualmente la erosión del suelo es uno de los mayores problemas a los que la agricultura moderna se enfrenta. Este problema se le adjudica en mucha mayor proporción a la agricultura industrial, la cual utiliza grandes áreas de cultivo a través con un sistema de labranza sin ningún tipo de protección al suelo, uso de grandes cantidades de fertilizantes y, generalmente, monocultivos.

El suelo responde al manejo que se le brinde, es por eso que si se pretende cambiar alguna característica del suelo, se deben dar diferentes manejos. Uno de los elementos más importantes y susceptible al manejo en un suelo agrícola es la materia orgánica. El manejo para obtener un incremento en la materia orgánica en un suelo agrícola está asociado a la agricultura de conservación, la cual conlleva la labranza mínima o cero; el uso de una cobertura vegetal continua y protectora formada por materiales vegetales vivos o muertos sobre la superficie del suelo; por último la rotación de cultivos. Cabe destacar a los cultivos perennes por la poca alteración del suelo durante su manejo en su larga vida (FAO 2002, FPP 2015).

3.6.1 Agricultura de conservación

La agricultura de conservación es un concepto para el manejo de agro-ecosistemas, tiene como objetivo lograr una agricultura sostenible y rentable. Busca la seguridad

alimentaria y mayor rentabilidad económica para el productor, pero con un remarcado interés en conservar y reforzar al mismo tiempo los recursos naturales y el medio ambiente. Los sistemas de la agricultura de conservación reducen el excesivo movimiento y mezcla del suelo y mantienen los residuos de los cultivos sobre la superficie para minimizar el daño al medio ambiente.

La agricultura de conservación se caracteriza por tres principios interrelacionados que a continuación se describen brevemente:

-Siembra directa con la mínima alteración mecánica del suelo; este término se usa en la agricultura de conservación como sinónimo de agricultura de no-labranza o labranza cero. La no-labranza implica cortar o aplastar las malezas y los residuos del cultivo anterior y sembrar directamente a través de la capa de cobertura. En 2005 se reportó una extensión a nivel mundial de 100, 000 ha de tierras sembradas con el sistemas de no labranza (Lal, 2009).

-Cobertura permanente del suelo por residuos y coberturas de cultivos. Los residuos adicionados al suelo están representados por residuos orgánicos, como lo son las compostas o el estiércol animal. Los cultivos de cobertura son coberturas vegetales vivas que cubre y protegen al suelo, el cual usualmente esta cultivado en asociación con otras plantas.

-La rotación de cultivos. Es necesaria para ofrecer una fuente de alimentación variada a los microorganismos del suelo; dado que están ubicados a distintas profundidades del suelo, son capaces de explorar las diferentes capas de suelo en busca de nutrientes. Los nutrientes que han sido lixiviados a las capas más profundas y que no están disponibles para el cultivo comercial, pueden ser reciclados por los cultivos de la rotación. Esta forma de rotación de cultivos funciona como un motor biológico.

El sistema de agricultura de conservación ha tenido un desarrollo exitoso en diferentes regiones del mundo, este sistema tiene un gran potencial para secuestrar carbono en suelos. Investigaciones científicas durante las pasadas décadas han demostrado una contribución significativa en la reducción de emisiones de GEI por parte de la agricultura de conservación, así como en el secuestro de carbono orgánico en suelos en forma de

materia orgánica. El aumento de la materia orgánica se lleva a cabo mediante la descomposición de las raíces y la contribución de los residuos vegetales sobre la superficie, el cual se descompone lentamente y la liberación de CO₂ por procesos de respiración del suelo también ocurre lentamente. Así el balance total, resulta en una fijación o secuestro de carbono orgánico en suelo (FAO, 2015).

Debido a las restricciones ambientales por el clima, paisaje y vegetación la tasa de secuestro de carbono varía en diferentes partes del mundo. Sin embargo, de manera general, el secuestro de carbono en suelo durante la primera década de implementación de la agricultura de conservación, es de 1.8 toneladas por hectárea anuales. Se estima que 5 millones de hectáreas agrícolas con este sistema serían necesarias para capturar una tercera parte de las emisiones anuales de CO₂ provenientes de la quema de combustibles fósiles a nivel global (FAO, 2008).

Dentro de la práctica de agricultura de conservación, se puede alternar con diferentes opciones para llevar a cabo esta agricultura. Por ejemplo, se pueden utilizar cultivos perennes y alternar con otro tipo de cultivos estacionales entre surcos, para el caso de las coberturas orgánicas se puede utilizar diferentes tipos de materiales orgánicos, como lo es la composta o el estiércol animal.

El estiércol animal puede proporcionar de nutrientes a los cultivos donde es aplicado como lo son el nitrógeno y el fósforo, disminuyendo la necesidad de aplicación de fertilizantes químicos. La aplicación de estiércol también puede mejorar las propiedades físicas y los niveles de nutrientes presentes en suelo, además incrementa los niveles de carbón orgánico en suelo. Por lo anterior, la aplicación de estiércol puede ser una práctica para la seguridad alimentaria (Liu et al, 2003). Varios experimentos a largo plazo en Europa han demostrado que la tasa de secuestro de carbono en suelos ha sido mayor con la aplicación de estiércoles que con fertilización química (Jenkinson, 1990). Sin embargo, existe el riesgo que el uso excesivo de estiércol el es suelo conlleve a daños ambientales por la lixiviación de elementos nitrogenados que puedan llegar a mantos freáticos.

3.6.2 Manejo de suelos agrícolas con estiércol

El estiércol es una mezcla de las heces de los animales con los orines y la cama. La cantidad producida y en el contenido de nutrientes del estiércol depende de diversos factores, entre los que destacan el tipo de ganado, la alimentación, condiciones ambientales y las condiciones de manejo (Iglesias, 1995).

Desde tiempo atrás el estiércol del ganado doméstico se ha utilizado como abono para las tierras agrícolas. Por muchos años, a las excretas de ganado se les han reconocido beneficios como fuente de nutrientes para las plantas y como mejoradoras de las condiciones fisicoquímicas del suelo. Sin embargo, los especialistas agropecuarios y ambientalistas han enfatizado sobre las consecuencias negativas del uso de estiércoles, por los efectos causados, principalmente al agua y al aire. Por tal motivo, se ha puesto mayor atención a medidas de manejo que reducen las emisiones, con énfasis en aquellas prácticas que aportan a la vez, utilidad, como la producción de biogás, bioenergía y biofertilizantes.

La FAO^A (2014) establece los impactos positivos y negativos del uso del estiércol en los suelos agrícolas, además de ofrecer algunas opciones para el mejoramiento del manejo del estiércol para un menor impacto negativo al medio ambiente, a continuación se muestran el impacto positivo y negativo del uso de estiércol en base a FAO:

Impacto Medioambiental Positivo

-Fertilización del suelo por aplicación de estiércol: la descomposición de la materia orgánica por los microorganismos produce dióxido de carbono (CO₂) de lenta liberación, agua y minerales de los nutrientes vegetales tales como N, P, S y metales. La mineralización es la transformación de elementos con enlaces orgánicos en nutrientes disponibles para las plantas. La aplicación de estiércol a los campos de cultivo o a las pasturas reducirá los requerimientos de fertilizante artificial.

-Mejoramiento de la fertilidad del suelo: se asume que la materia orgánica que permanece en el suelo después de un año de la aplicación forma parte del mismo y se

descompondrá gradualmente con el paso del tiempo, liberando nutrientes para las plantas.

-Mejoramiento de la estabilidad estructural del suelo. La materia orgánica también está involucrada en las propiedades físicas del suelo, tales como porosidad, aireación y capacidad de retención de agua. Por lo tanto mejora la estructura del suelo y reduce la vulnerabilidad de éste a la erosión.

-Mejoramiento del potencial del fertilizante inorgánico: la materia orgánica en el suelo incrementa la capacidad de absorción de minerales, reduciendo la pérdida de los elementos traídos con los fertilizantes. Los elementos absorbidos son liberados gradualmente para la nutrición de las plantas.

Impacto Medioambiental Negativo

-Emisiones de Amoníaco: antes y durante el almacenamiento y durante la aplicación a los campos.

-Emisión de NO: éste se forma como un producto secundario del proceso de desnitrificación.

-Emisión de Metano: formado durante la descomposición del estiércol bajo condiciones anaeróbicas.

-Escorrentía del estiércol y de sus componentes hacia el agua superficial: contribuyendo a la contaminación acuática.

-Lavado de nitratos y fósforo al agua subterránea: contribuyendo a la contaminación de aguas subterráneas.

Capítulo 4. Desarrollo agrícola en el Valle de México y producción de nopal en Milpa Alta al sur del Distrito Federal.

4.1 Desarrollo de la agricultura en el Valle de México

La agricultura en México se ha desarrollado desde al menos 9,000 años, la variabilidad en altitud, latitud y topografía en el país ha brindado las condiciones ideales para la formación de microambientes, y como consecuencia, una gran cantidad de prácticas agrícolas así como culturales. La cultura Azteca desarrolló el sistema agrícola llamado chinampa, que le permitió hacer un uso eficiente a los diversos recursos naturales en el Valle de México. El conocimiento y las técnicas de manejo agrícola de cómo cultivar fueron aprendidos a base de ensayo y error. Con la llegada de los españoles nuevas técnicas, plantas, animales y herramientas (de metal) fueron utilizadas para el desarrollo agrícola, logrando cambios que hasta la fecha, algunas se conservan (Rivera, 2002).

El Distrito Federal (DF) se encuentra dentro del Valle de México, cuenta con una altura promedio de 2,240 msnm, está rodeado por sierras que tienen una altura mayor a los 4,000 msnm, fue construido sobre un sistema de lagos que en su tiempo abarcaba 1 500 km², lo cual permitió el desarrollo de las denominadas chinampas, las cuales eran balsas flotantes que permitían la producción de alimentos como la horticultura. Además, en terrazas de las laderas de las montañas se practicaba el cultivo mixto de maíz, frijol y calabaza conocido como milpa (FAO, 2014).

4.1.1 Producción agrícola en el Distrito Federal

El Distrito Federal está dividido en 16 delegaciones, tiene una población de 8, 851,080 ciudadanos que representan el 7.9% del total poblacional del país (INEGI, 2014). El DF cuenta con una superficie de 149,800 hectáreas, representa casi el 0.1% de la superficie del país. De lo anterior, un número de 61,082 ha (41%) corresponden a suelo urbano y 88,442 ha (59%) a suelo de conservación. Dentro del suelo de

conservación se encuentran 31,807 ha con actividad agrícola, 8,306 ha con pastizales y producción pecuaria y las 39,304 ha restantes corresponden a áreas forestales. El Suelo de Conservación del DF es un área protegida creada en 1992 para salvaguardar los servicios ambientales de la ciudad tales como la provisión de agua potable y oxígeno (CORENA 2015).

Las delegaciones que cuentan con actividades agrícolas son Álvaro Obregón, Cuajimalpa, Magdalena Contreras, Milpa Alta, Tláhuac, Tlalpan y Xochimilco (SIAP, 2015). En estas zonas se producen maíz, frutales, hortalizas y animales, principalmente para el autoconsumo familiar y la venta local, sin embargo también hay una producción a mayor escala de nopal, amaranto, hortalizas, hierbas y plantas ornamentales para los mercados urbanos y regionales. Casi el 90 % de la producción agrícola se realiza en condiciones de temporal.

La población económicamente activa ocupada en actividades agropecuarias en el DF asciende a unas 16, 000 personas, en 11 543 unidades de producción familiar. A pesar de la constante presión urbana, la agricultura ha logrado sobrevivir en la Ciudad de México gracias a la constante adaptación e innovación de los agricultores. Por ejemplo, el nopal ha reemplazado al maíz como principal cultivo en las laderas de Milpa Alta, y las flores se cultivan ahora en invernaderos localizados en antiguas chinampas (FAO, 2014).

4.1.2 Datos productivos del Distrito Federal

En el Distrito Federal, las tierras dedicadas a la producción de cultivos producen principalmente maíz, frutales, hortalizas y animales, generalmente para el autoconsumo familiar y la venta local, sin embargo también hay una producción a mayor escala de nopal, amaranto, hortalizas, hierbas y plantas ornamentales para los mercados urbanos y regionales (FAO,2009).

De acuerdo al Sistema de Información Agropecuaria y Pesquera (SIAP, 2015), existen 70 cultivos registrados en el Distrito Federal, tanto de riego como de temporal, el valor

de la producción agrícola en el 2013 ascendió a \$1, 422,630.28 miles de pesos, para lo cual se registró la siembra de 18,839.35 hectáreas y se cosecharon 18,662.57 ha, las 176.78 ha restantes fueron catalogadas como siniestradas.

Del total de los cultivos del DF, la avena forrajera ocupa el mayor porcentaje del área agrícola sembrada, con el 30.8%; le sigue el nopal con 23% y el maíz grano con el 21%, el 25.2% lo ocupan los 67 cultivos restantes. Sin embargo, en base al valor económico de la producción agrícola anual total, es el nopal el más importante en el DF, ya que representó el 60.7% en el año 2013, le sigue la noche buena con el 7%, la papa con el 6.3% y la avena forrajera con 3.8%. En tanto que los otros 66 cultivos aportan el 22.2% restantes (SIAP, 2015).

La delegación Milpa Alta es donde se concentra el mayor porcentaje del valor económico del total de la producción agrícola del 2013, con el 65%, además de ser la delegación con el mayor porcentaje de su territorio cultivado con 42.2%. Xochimilco representa el 16% del total del valor de la producción y 8.3% de su territorio cultivado, Tlalpan con 12 % y 32 % y Tláhuac con 6% y 13.5% respectivamente. Finalmente con una aportación marginal para las dos variantes, se encuentran las delegaciones Magdalena Contreras, Cuajimalpa de Morelos y Álvaro Obregón (SIAP, 2015).

Como se observó en las estadísticas anteriores, entre los diferentes cultivos presentes en el DF, destaca el nopal verdura, el cual representó el 60% del valor de la producción agrícola del DF en el 2013.

4.2 Producción de nopal

El nopal es una planta cactácea del género *Opuntia* que prospera sobre todo en las regiones áridas y semiáridas, por tal motivo esta planta se ha difundido ampliamente, desde su lugar de origen, hacia todo el mundo. La familia de las cactáceas agrupa a una gran diversidad de plantas, entre las que destacan los cactus; las biznagas; las pitahayas y una gran variedad de nopales, entre otras. La familia es originaria del continente americano y apareció hace cerca de 80 millones de años. El grupo está

constituido por cerca de 2,000 especies, distribuidas en todo el continente americano, desde el norte de Canadá hasta la Patagonia, y desde el nivel del mar, en dunas costeras, hasta los 5,100 msnm, en Perú (Jiménez, 2011; CNZA, 1994).

De las diferentes especies de opuntia reconocidas, hay solo 10 o 12 especies hasta ahora utilizadas por el hombre, ya sea para producción de fruta y nopalitos para alimentación humana, forraje o cochinilla para obtención de colorante. Entre las diferentes especies se encuentran las cultivadas para producción de fruta: *Opuntia ficus-indica*, *O. amyclaea*, *O. xocconostle*, *O. megacantha* y *O. streptacantha*; las especies silvestres: *Opuntia hyptiacantha*, *O. leucotrichay* *O. robusta*. De las especies citadas, la más utilizada es *Opuntia ficus indica* (FAO, 2006).

El nopal verdura u *Opuntia ficus-indica*, es uno de los cultivos cactáceos con mayor tiempo de domesticación, es también la cactácea más dispersa e importante económicamente como cultivo a nivel mundial (Griffith, 2004). Se cultiva en América, África, Asia, Europa y Oceanía, sólo en México existen más de 10,500 ha para la producción de cladodios tiernos (nopalitos) consumidos como verdura (Reyes, 2005). En la agricultura actual de México es tan importante como el cultivo de agave tequilero o el maíz.

En muchos países es un cultivo apreciado por generar empleos e ingresos económicos importantes; además es un cultivo de alto impacto ecológico debido a la alta eficiencia en el uso del agua, retención de suelo, alimento para la fauna silvestre, fijación de carbono, entre otros aspectos. Recientemente, el nopal verdura ha sido revalorado como una planta con propiedades medicinales y cuyo consumo aporta nutrientes y beneficios a la dieta humana. Antiguamente el nopal era utilizado como un remedio popular para la curación de heridas, úlceras y gastritis. Actualmente diversos estudios mencionan los efectos benéficos en el tratamiento de enfermedades como diabetes, colesterol y obesidad (INIFAP, 2011).



Figura 4.1. Distribución de cultivos de Opuntia en el mundo (FAO, 2006).

4.2.1 Antecedentes del Nopal en México

Dentro de las cactáceas, el género *Opuntia* es el más diverso y ampliamente distribuido en América con alrededor de 200 especies. En México se ha considerado hasta 93 especies de *Opuntia* silvestres, casi el 50% del total de las especies conocidas del género *Opuntia* en el Continente Americano, de las cuales 62 (66.7%) son endémicas del país (CONABIO, 2011).

Para las culturas precolombinas, el nopal se convirtió en una planta muy importante en el desarrollo de las civilizaciones del norte, centro y sur del país, su destino fue básicamente para consumo humano, en forma de fruto y verdura. En la cultura azteca, el nopal tenía gran influencia económica, social y religiosa, lo cultivaron para beneficiarse de la tuna y el nopalito que consumían como verdura. En los huertos se cultivaba la cochinilla, que es una plaga del nopal y de la cual extraían un colorante que se utilizaba para teñir hilos y telas. Posteriormente, tras la conquista española, el cultivo del nopal empieza a prosperar en las haciendas, ranchos y casas de los peones, adquiriendo importancia por el aprovechamiento como fruta, verdura y forraje en época de sequía. Los españoles también dieron un gran valor al nopal, principalmente como

forraje para ganado, y lo diseminaron en América, España, Francia e Italia. Los moros lo llevaron al norte de África y los portugueses lo introdujeron a Brasil, Angola y la India (INEGI, 2007).

Actualmente en México el nopal se usa para diferentes fines según la región, así tenemos que en la zona norte de país el nopal es aprovechado como forraje, en el centro como fruta y verdura principalmente. Como ejemplo se tiene que el norte del país se ha utilizado el nopal desde hace muchas décadas para la alimentación del ganado. Como dato histórico se sabe que en 1966 se utilizaron en Monterrey 600 ton y en Saltillo 100 ton de nopal para la alimentación del ganado lechero estabulado. Algunas zonas del estado de México y otras del estado de Hidalgo, se destacan por la calidad del fruto del nopal. En Milpa Alta, en el Distrito Federal se impulsa la producción del nopal para consumo como verdura (Granados y Castañeda, 1991).

4.2.2 Características del nopal

Las cactáceas, familia a la que pertenece el nopal, han evolucionado características anatómicas y fisiológicas particulares, que les han permitido colonizar los ambientes áridos. Entre ellas podemos mencionar la estructura suculenta, la cual les permite acumular gran cantidad de agua en sus tejidos. Sus hojas se han reducido o prácticamente están ausentes, con lo cual reducen la evapotranspiración, y la fotosíntesis se lleva a cabo entonces en la superficie de sus tallos. Desde una perspectiva fisiológica, los cactus se distinguen de la mayoría de las plantas verdes porque, al igual que otras plantas suculentas (agaves y siempre vivas), su fotosíntesis sigue una ruta metabólica peculiar, conocida como “metabolismo ácido crasuláceo” o CAM, con la cual se logra economizar agua, ya que el intercambio gaseoso se realiza durante la noche cuando la temperatura del ambiente es más baja (Jiménez, 2011).

La planta de nopal ha sido descrita por numerosos autores, a continuación se cita una breve descripción que FAO (2006) hace para las diferentes características de la planta:

-Los nopales son plantas arbustivas, rastreras o erectas que pueden alcanzar 3,5 a 5 m de altura. El sistema radical es muy extenso, densamente ramificado, rico en raíces finas absorbentes y superficiales en zonas áridas de escasa pluviometría. La longitud de las raíces está en relación con las condiciones hídricas y con el manejo cultural, especialmente el riego y la fertilización.

-Los tallos suculentos y articulados o cladodios, comúnmente llamados pencas, presentan forma de raqueta ovoide o alongada alcanzando hasta 60-70 cm de longitud, dependiendo del agua y de los nutrientes disponibles. Cuando miden 10-12 cm son tiernos y se pueden consumir como verdura. Sobre ambas caras del cladodio se presentan las yemas, llamadas aréolas, que tienen la capacidad de desarrollar nuevos cladodios, flores y raíces aéreas según las condiciones ambientales. Los tallos se lignifican con el tiempo y pueden llegar a transformarse en verdaderos tallos leñosos.

-Las aréolas presentan en su cavidad espinas, que generalmente son de dos tipos: algunas pequeñas, agrupadas en gran número -en México comúnmente se llaman aguates- y las grandes que son, según algunos botánicos, hojas modificadas. Las flores son sésiles, hermafroditas y solitarias, se desarrollan normalmente en el borde superior de las pencas. Su color es variable: hay rojas, amarillas, blancas, entre otros colores.

4.2.2.1 Taxonomía del nopal verdura

La taxonomía de los nopales es compleja por la gran confusión que generan los sistemas de clasificación, sólo un intenso trabajo de campo permite reconocer e identificar las especies, sus variedades y adaptaciones reflejadas en su fenotipo.

Actualmente se reconoce que el nopal verdura pertenece a la familia de las cactáceas, específicamente al género *Opuntia*, subgénero *Platyopuntia*. A continuación se muestra una tabla para la descripción taxonómica del nopal verdura (INEGI, 2007).

Clasificación taxonómica del nopal

Reino	<i>Vegetal</i>
Subreino	<i>Embryophyta</i>
División	<i>Angiospermae</i>
Clase	<i>Dicotyledoneae</i>
Subclase	<i>Dialipétalas</i>
Orden	<i>Opuntiales</i>
Familia	<i>Cactaceae</i>
Tribu	<i>Opuntiae</i>
Subfamilia	<i>Opuntioideae</i>
Género	<i>Opuntia</i>
Subgénero	<i>Platyopuntia</i>
Especie	<i>Varios nombres</i>

Tabla 4.1 Taxonomía del nopal (INEGI, 2007).

El nombre *Opuntia* fue dado por Tournefort en 1700, aunque su aceptación bajo el sistema binomial que Linneo estableció en 1753, fue efectuada por Philip Miller en 1754, ya que Linneo no aceptó *Opuntia*, sino sólo un género: *Cactus*, Linneo publicó al *Cactus opuntia* y *Cactus ficus-indica* en *Species Plantarum*, Miller combinó éstos en *Opuntia ficus-indica* (Kiesling, 2013; Griffith, 2004).

4.2.3 Uso de nopales como recurso natural

Estas cactáceas han jugado un papel ecológico decisivo al poder frenar la degradación de suelos deforestados. Si se considera la porción de superficie terrestre árida o semiárida apta para cultivar estas especies que requieren poco o ningún aporte de agua, puede comprenderse su importancia ecológica y agronómica. Ante el alto grado de perturbación ambiental, el nopal puede ser una alternativa potencial para captar parte del incremento de CO₂ por ser una de las pocas especies que pueden establecerse con éxito en superficies deterioradas (FAO, 2006). Ya que el nopal consume grandes cantidades de CO₂, se ha recomendado su uso masivo en los camellones de las avenidas principales de las grandes ciudades (Santos, 2007).

4.3 Producción de Nopal en la delegación Milpa Alta

Como ya se mencionó, México es considerado como el centro de origen del nopal y como el mayor productor de este para consumo humano. Dentro del país, existen diferentes zonas productoras de nopal verdura, siendo la zona centro la que mayores volúmenes de producción registra. Específicamente la delegación Milpa Alta, situada al sur del Distrito Federal, es donde se encuentra concentrada casi la totalidad del cultivo de nopal del DF.

La delegación Milpa Alta es prácticamente la única zona del Distrito Federal que todavía conserva áreas en condiciones adecuadas para albergar diferentes especies de flora y fauna del Valle de México. Este hecho se debe a la combinación de diferentes factores como que tiene el menor número de habitantes; la actividad económica de la zona se enfoca principalmente a la agricultura, limitando el crecimiento urbano; y la actividad industrial es de las más bajas del Valle de México. Esto permitió que el nopal encontrara una zona natural donde se pudiera desarrollar en base a su demanda y sin competir por espacio con el área urbana.

Desde su aparición, el cultivo del nopal ha impactado de manera positiva en la delegación Milpa Alta, ya que genera empleo, arraigo y estabilidad social a las familias que se dedican de manera directa e indirecta a este proceso de producción (Ponce, 2011).

4.3.1 Desarrollo de la producción de nopal en Milpa Alta

Desde épocas remotas, en la zona de Milpa Alta se ha cultivado, maíz, chícharo, frijol, haba, papa, trigo, y árboles frutales como higo, durazno, chabacano, tejocote y capulín, además de maguey para la obtención de pulque. Este último fue la mayor fuente de ingresos de Milpa Alta durante, el cual se fue perdiendo debido al lento ciclo del maguey (Granados y Castañeda 1991).

El cultivo del nopal verdura se inició en 1938, fue introducido por el señor Florentino Flores Torres del barrio de la Concepción, quien empezó a experimentar con ese cultivo, éste observó que la nopalera producía ganancias y requería menos cuidado y tiempo que otros cultivos, comenzando a crecer la superficie sembrada con nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*). Sin embargo, fue en las últimas cuatro décadas del siglo pasado, que los Milpaltenses encontraron en la producción de nopal un cultivo mucho más rentable, sustituyendo al maguey pulquero y los otros cultivos que tradicionalmente se sembraban. Por tal motivo la superficie destinada al cultivo del nopal verdura, se incrementó considerablemente. En Milpa Alta desde hace aproximadamente 40 años la producción de este cultivo se ha convertido en el eje de la economía de los agricultores de esta región (INEGI, 2007).

Actualmente el nopal verdura cuenta con la segunda mayor área de cultivo y el mayor valor económico de la producción por cultivo para el Distrito Federal, en el año 2013 contó con una superficie sembrada de 4,331 hectáreas y un rendimiento promedio de 62 to/ha. Se dedican un aproximado de 5,000 productores a esta actividad. En base a información del SIAP, la producción y el valor económico de nopal verdura en la delegación Milpa Alta para el año 2013 represento el 34% y 45% del total nacional respectivamente, lo cual representa 270,064 toneladas de producto y un valor de 863,717.5 miles de pesos (SIAP, 2015). A nivel nacional, y mundial, se reconoce a la Delegación de Milpa Alta del distrito Federal como el principal productor de nopal verdura (Ponce, 2011).

4.3.2 Manejo de las parcelas del cultivo nopal

Por la importancia que tiene el nopal verdura en la delegación Milpa Alta del Distrito Federal, es de interés mencionar los cuidados y prácticas agronómicas que se le da al cultivo para poder alcanzar una producción redituable. Como cualquier otro cultivo, es relevante considerar todo el proceso productivo y en este caso, INEGI (2007) e INIFAP (2000) han desarrollados manuales y bases de datos referente al sistema productivo que rige en la delegación Milpa Alta, a continuación se muestra lo más relevante.

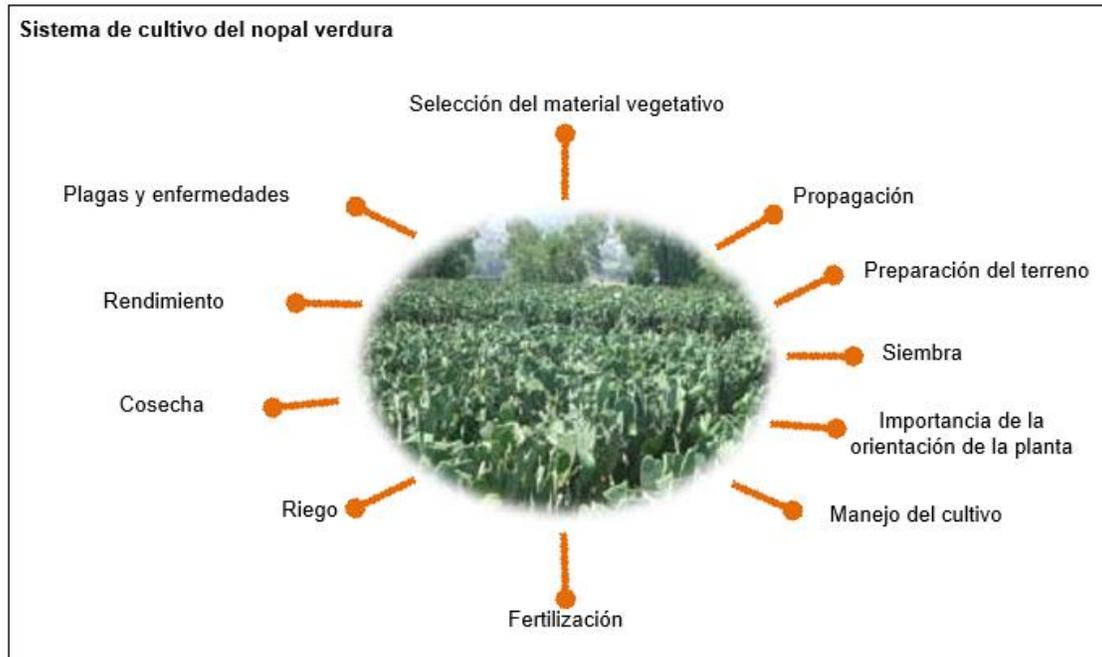


Figura 4.2. Pasos en el manejo de siembra y mantenimiento de un cultivo de nopal (INEGI, 2007).

Para realizar la siembra de nopal lo primero que se debe de hacer es seleccionar el material que se sembrará, la multiplicación de las plantas es asexual, por lo que se utilizan las pencas de las plantas para la propagación del cultivo. Primero se elige una penca, o cladodio de nopal, que pertenezca a una planta presente en el área cercana a la nueva siembra, para que las condiciones climáticas y de suelos sean similares. La penca deberá estar libres de plagas y enfermedades, tener tamaño entre 25-30 cm de largo y llevarse a la sombra para que no se deshidraten y cicatrice el corte.

El área donde se realizará la siembra se debe preparar con limpia y barbecho del terreno, con esto la tierra se suaviza y puede realizarse la siembra de la penca, si el terreno muestra alguna pendiente se deben realizar terrazas en el terreno.

Para realizar la siembra, se recomienda que se haga en la época de sequía, ya que en época lluviosa, con la excesiva humedad del suelo y las condiciones climáticas se optimiza el desarrollo de hongos y bacterias. La siembra se hace en hileras y tendrán

una distancia entre ellas de entre 70 cm y 1.5 m, las pencas que conforman cada hilera se colocan entre 20 y 50 cm de distancia entre cada una y otra, la profundidad a la que se siembra la penca es entre 10 y 20 cm. La plantación debe tener una orientación de Norte-Sur, con lo que los cladodios estarán con sus caras hacia el Este-Oeste, de esta manera hay mayor eficiencia fotosintética y un mayor desarrollo de raíces.

Durante el crecimiento y mantenimiento del cultivo se debe de tener ciertos cuidados en el desarrollo de la planta, primero se debe de podar para dar forma a la planta así como para eliminar cladodios en mal estado, enfermos o parasitados, también se debe realizar un control de maleza para evitar competencia por nutrientes.

La fertilización que las nopaleras reciben durante su producción es muy importante para que los rendimientos se mantengan altos a través del enriquecimiento del suelo. La práctica común realizada en Milpa Alta es la aplicación de abonos orgánicos, específicamente estiércol bovino. El riego a los cultivos de nopal en la delegación Milpa Alta prácticamente no existe, debido a que aprovecha los altos niveles de humedad que la aplicación de estiércol confiere a los suelos de cultivos de nopal.

Una vez que la planta empieza a producir, la cosecha de nopal verdura se realizará durante todo el año. El nopal se corta de la base del cladodio, generalmente insertando la punta de un cuchillo y girando el nopal de la base para su desprendimiento, inmediatamente se almacena en cajas para transportarlo y se colocan en sombra para evitar la deshidratación a causa del sol. Los rendimientos de cultivos de nopal varían según la época del año, registrándose los mayores rendimientos en los meses secos.



Figura 4.3. Capa de estiércol bovino en suelo de cultivo de nopal y método de cosecha de nopal.

4.3.3 Uso de estiércol en la producción de nopal

El uso de estiércol como abono orgánico en los cultivos de nopal de la delegación Milpa Alta es utilizado debido a que mejora la disponibilidad de nutrientes para planta, reflejándose en mayores rendimientos.

La aplicación del estiércol en los cultivos se puede realizar de diferentes formas, siendo la más común la aplicación de una capa de entre 10 y 30 cm grosor en la totalidad del terreno; otra forma de aplicación es haciéndolo solamente en la base de la planta. Los productores de Milpa Alta realizan la aplicación de estiércol la una vez al año y en algunos casos de manera bianual. La mejor época del año para la aplicación del estiércol es en los meses de marzo a mayo, cuando el clima es seco (INEGI, 2007).

En base a información proporcionada de algunos productores entrevistados en sus parcelas, la mayor cantidad de estiércol es traído desde la cuenca lechera de Tizayuca por personas dedicadas específicamente a esta actividad, el estiércol se puede comprar en los puntos de venta localizados dentro de la delegación Milpa Alta. Aunque todos los productores coinciden en que la aplicación de estiércol es un fuerte gasto, es una actividad obligatoria si quieren asegurar volúmenes productivos altos.

En base en estimaciones de Losada (2001) el cultivo es fertilizado con 600 ton/ha, el cual tiene como característica que es rico en rastrojos de cereales y alto contenido en

humedad. Esta aplicación les genera diferentes beneficios como lo es la retención de humedad y el aumento de la productividad

4.4 Características de la zona de estudio

La zona de trabajo se encuentra en la delegación Milpa Alta, que es una de las 16 delegaciones que conforman el Distrito Federal y se encuentra localizada al sur de la ciudad. Milpa Alta es una delegación plenamente reconocida por ser ámbito de pueblos autóctonos, actualmente cuenta con 12 pueblos (Farfán, 2008).

La delegación Milpa Alta tiene una extensión de 28,375 hectáreas y representa el 19.06 % de la superficie del Distrito Federal. La totalidad de la delegación se localiza en suelo de Conservación, esto representa el 32.2% de las 87,294.4 hectáreas de suelo de conservación del Distrito Federal (SEDUVI, 2011).

La Delegación tiene una altitud entre 2 200 y 3 600 msnm. Limita al norte con las delegaciones Tláhuac y Xochimilco; al oeste con la delegación Tlalpan; al oriente con los municipios mexiquenses de Chalco, Tenango del aire y Juchitepec; así como al sur con Tlalnepantla y Tepoztlán, que son municipios del estado de Morelos (SEDESOL, 2011).

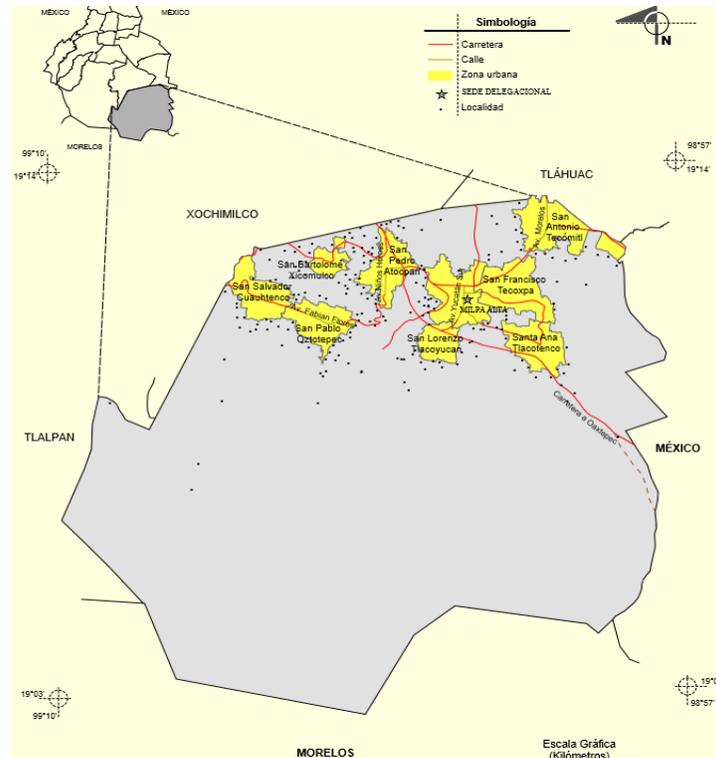


Figura 4.4. Localización de la delegación Milpa Alta en el DF (SEDESOL, 2011).

4.4.1 Características fisiográficas de la delegación Milpa Alta.

Clima

En base al Atlas Geográfico del Suelo de Conservación del Distrito Federal (GDF, 2012), el cual presenta una modificación del sistema de Köppen realizada por E. García y como consecuencia de las diferencias de relieve y altitud, en la Delegación Milpa Alta se identificaron cuatro grupos de climas, en específico para el área de trabajo se tiene la convergencia de dos climas:

-Cb(w1)(w) Templado subhúmedo, verano fresco. Esta clasificación abarca una extensión de 5 597.36 hectáreas de la delegación.

-Cb(w2)(w) Templado subhúmedo, verano fresco. Esta clasificación abarca una extensión de 8 129.52 hectáreas de la delegación.

El índice de precipitación anual promedio es de 1,194.7 mm (GDF, 2012). A medida que asciende la altitud, el clima de la delegación se torna más frío, en promedio, en las zonas de mayor altura se presenta una temperatura de 8°C, y en las partes más bajas de 14°C. Se tienen abundantes lluvias en verano (SEDUVI, 2011).

Los vientos dominantes provienen del sur, excepto durante los meses lluviosos donde los vientos dominantes provienen del noroeste, (SEDESOL, 2011).

Fisiografía

El sistema de provincias fisiográficas da como resultado que las formas preponderantes (geomorfología) de Milpa Alta sean los escarpes y superficies de lava, en donde el volcán Teuhtli es un cono de deyección. A partir de la orografía que se presenta en esta demarcación, se divide en tres zonas orográficas definidas: Ajusco-Teuhtli, que corresponde a la franja más baja de la sierra; Topilejo-Milpa Alta, en la parte media; y Cerro-Tlicuayo, en la parte alta de la sierra (SEDUVI, 2011).

La Delegación se encuentra ubicada en la provincia fisiográfica denominada Eje Neovolcánico, en la subprovincia Lagos y Volcanes y en el sistema Sierra Volcánica, en su totalidad dentro de la Sierra Ajusco Chichinautzin, zona de origen volcánico reciente, en donde los suelos se encuentran en proceso de formación, la cual se considera como una de las regiones de mayor permeabilidad.

La fisiografía del lugar está compuesta en cinco tipos; en mayor proporción una sierra volcánica con estrato volcanes o estrato volcanes aislados (86 %), lomerío de basalto con cráteres (4%), mesetas (2%), vaso lacustre (1%) y vaso lacustre de piso rocoso o cementado (7%) (SEDESOL, 2011).

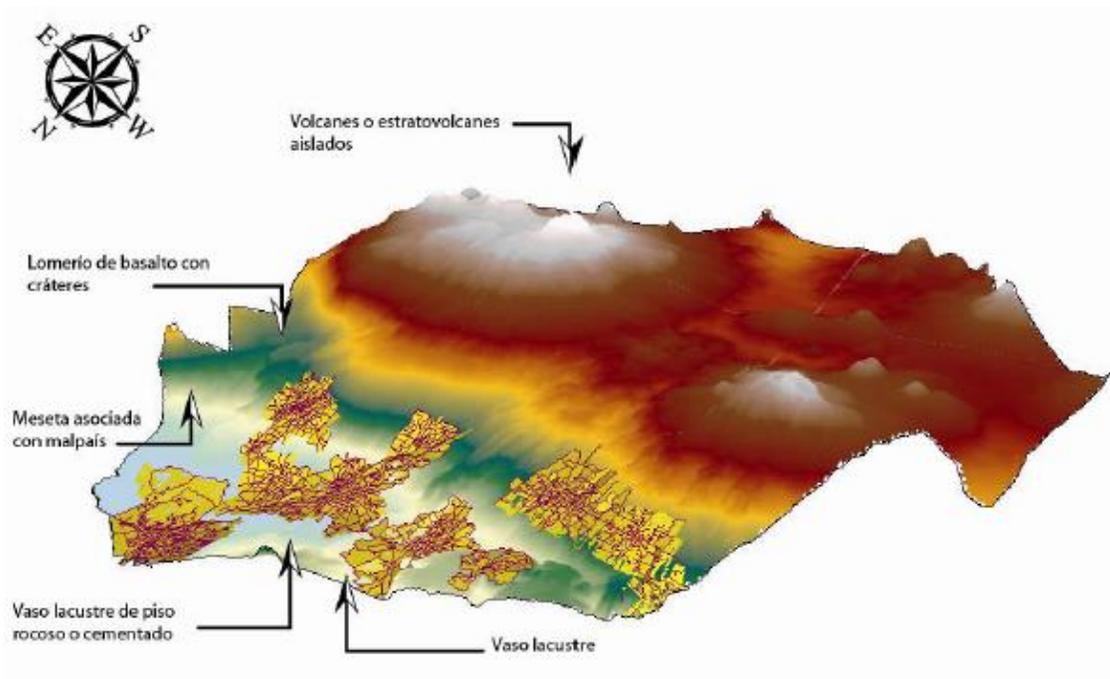


Figura 4.5. Geformas de la delegación Milpa Alta (SEDESOL, 2011).

Hidrografía

El Valle de México se encuentra dentro de tres regiones hidrológicas: Pánuco, Balsas y Lerma-Santiago. La mayor parte de la delegación Milpa Alta (60%) se encuentra dentro de la región hidrológica denominada Pánuco, en la cuenca del río Moctezuma y en la subcuenca del Lago de Texcoco-Zumpango. El resto de la delegación pertenece a la región hidrológica del Balsas, dentro de la cuenca del río Grande de Amacuzac, subcuenca del Río Yautepec.

Sin embargo, la delegación Milpa Alta no posee ninguna corriente permanente de agua por la característica porosa de sus suelos. En temporada de lluvias, de las laderas de sus cerros escurren pequeños arroyos, de los cuales, los más grandes son el Cuauhtzin, que escurre del cerro de ese mismo nombre, y el Tlatixhuatanca, que escurre por la ladera norte del volcán Tláloc (SEDUVI, 2011).

Suelos

Milpa Alta por estar enclavada dentro de la Sierra Ajusco Chichinautzin, tiene una estructura edafológica que responde a los procesos tectónicos y volcánicos de esta área. En el centro, sur y poniente de Milpa Alta, los suelos dominantes son el AndosolHúmico y el Litosol, en el norte, y al este se presentan suelos clase FeozemHáplico y Litosol. El suelo está formado básicamente por depósitos de lavas escoráceas, aglomerados y piroclásticos gruesos y finos que presentan alta permeabilidad, conformando una de las principales zonas de recarga del acuífero de la cuenca, además se presentan arenas y limos arcillosos en capas angostas al pie de las elevaciones.

Actualmente el 10% del total de la superficie de la delegación se encuentra ocupado por los núcleos urbanos de los 12 Poblados Rurales en que se divide esta Delegación Política. El 41% de dicha superficie está dedicada al desarrollo de actividades agropecuarias y en el 49% restante se encuentran las zonas boscosas, (SEDUVI, 2011).

4.4.2 Características bióticas

Flora

Para la delegación Milpa Alta se encuentran cuatro tipos de cobertura forestal: bosque perturbado, bosque sin perturbar, matorrales y pastizales de alta montaña. La vegetación no forestal se encuentra representada principalmente por cultivos agrícolas y pastizales inducidos (GDF, 2012).

Por lo que respecta a la vegetación forestal, la mayor parte de la superficie que abarca la Delegación de Milpa Alta (49%), se encuentra ocupada por bosques de cedros, oyamel, madroños, ocote y encino, en tanto que el estrato arbustivo se encuentra conformado por hierba del golpe, palo loco y yuca; en las partes más bajas, escobilla, tabaquillo, tepozán y magueyes de la especie *Agave Ferox*. En el estrato herbáceo se encuentran trompetillas, mirtos, jarritos de cuatro especies *Penstemonroseus*, *Chusqueatondusii*, *Clethraalcocerii* y *Eysenhardtia polystachya*. Las gramíneas son

abundantes, entre ellas destacan los pastos silvestres e introducidos, los cuales cubren el 18% del total de la superficie de la Delegación (SEDUVI, 2011).

Fauna

En la zona que corresponde a Milpa Alta se encuentran reportadas la fauna siguiente: 10 especies de anfibios, 15 de reptiles, 28 de murciélagos, 1 de marsupial, 4 de musarañas, 1 de armadillo, 6 de conejos y liebres, 34 de roedores, 1 de coyote, 1 de zorra, 3 de prociónidos, 5 de mustélidos, 1 de venado, y 2 de felinos, fauna que se considera representativa de las montañas del Valle de México. En cuanto a la ornitofauna, esta zona es considerada como crítica para la conservación de las aves de México, por su alto grado de endemismo. Dentro de éstas, el gremio trófico más común es el de las especies insectívoras (23 especies), seguido por los granívoros (5), carnívoros (4), nectarívoros (3) y omnívoros (3) (SEDUVI, 2011).

4.4.3 Descripción de las parcelas

Las parcelas de estudio se localizan en el área geográfica los pueblos de San Lorenzo Tlacoyuan y Santa Ana Tlacotenco de la delegación. Las parcelas de nopal presentaban una heterogeneidad común en el suelo, sin embargo cada una se encontraba bajo características de manejo diferentes. La parcela de maíz era de temporal y contaba con fertilización química.

La parcela de nopal número uno se encuentra bajo las coordenadas; Latitud: 19°10'37.4"N, Longitud: 99° 1'34.4"O, con una altura de 2619 msnm, contaba con una superficie de 2,000 m²aproximadamente.

En base a la información proporcionada por el productor el abonado se realiza con estiércol bovino fresco, con aplicación bianual, colocando una cantidad aproximadamente ocho de centímetros de grosor sobre la superficie del suelo. Los surcos tienen un espacio entre ellos de 1.1 m, con una distancia entre plantas de 20 cm, teniendo por tanto una densidad de 4.5 plantas por metro cuadrado. En el momento

de la toma de muestra tenía un tiempo aproximado de un año de la última aplicación de estiércol.

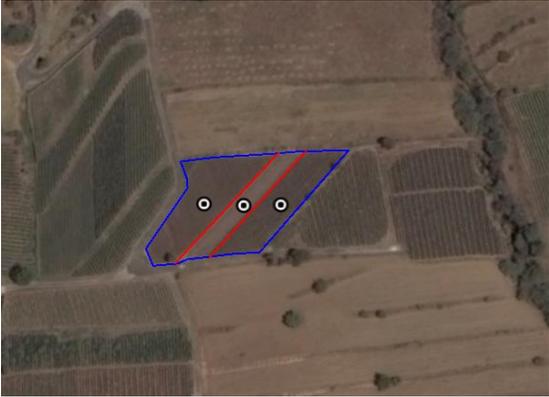
La parcela de nopal número dos se encuentra bajo las coordenadas; Latitud: 19°10'34.8"N, Longitud: 99°0'54.3"O, con una altura de 2637 msnm, con una superficie de 2,500 m² aproximadamente. Se abona con estiércol bovino, colocando una cobertura de 20 cm sobre el suelo aproximadamente, la aplicación del estiércol se realiza de manera bianual, en el momento de la toma de muestras el abonado se había realizado un par de meses antes, todo en base a lo comentado por el productor. Los surcos tienen un espacio entre ellos de 1.2 m, con una distancia entre plantas de 20 cm teniendo por tanto una densidad de 4.2 plantas por metro cuadrado.

La parcela de nopal número tres se encuentra bajo las coordenadas; Latitud: 19°9'49.3"N, Longitud: 99°2'40.3"O, con una altura de 2835 msnm, con una superficie de 1,000 m² aproximadamente. Se abona con estiércol bovino una vez al año, sin embargo el abonado es intercalado, esto quiere decir que se abona un surco sí y uno no, se aplica una capa de cinco centímetros aproximadamente. Los surcos tienen un espacio entre ellos de 1 m con una distancia entre plantas de 20 cm, teniendo por tanto una densidad de 5 plantas por metro cuadrado. En el momento de la toma de muestra tenía un tiempo aproximado de un año a la última aplicación de estiércol.

La parcela de maíz se encuentra bajo las coordenadas; Latitud: 19°10'33.15"N, Longitud: 99°1'31.6"O, con una altura de 2631 msnm, con una superficie de 2,000 m² aproximadamente. Se abona con fertilizantes químicos dos veces por ciclo, en el momento de la toma de muestra la plantación tenía una edad de cinco semanas aproximadamente. Los surcos tienen un espacio entre ellos de 75 cm con una distancia entre puntos de siembra similar, teniendo por tanto una densidad de 1.8 puntos de siembra por metro cuadrado. Cada punto de siembra contaba con alrededor de tres plantas, por lo que se tiene una densidad de plantas de 5.4.

A continuación se muestran las imágenes satelitales de las parcelas muestreadas. En las imágenes aparecen las parcelas delimitadas en su contorno por una línea azul,

también se muestran las divisiones que se le hicieron a cada parcela con una línea roja y al centro de cada división el punto donde se realizaron las tomas de muestras.



Parcela de nopal N. 1



Parcela de nopal N. 2



Parcela de nopal N. 3



Parcela de maíz

Figura 4.6 Imágenes satelitales de la segmentación y puntos de muestreo de las parcelas evaluadas

CAPITULO 5. METODOLOGÍA

A continuación se presenta la metodología, empleada en el presente trabajo, para la toma de muestras y determinación de las propiedades físicas y químicas de suelos de las parcelas de las nopaleras de Milpa Alta.

Existen diferentes métodos de análisis en laboratorio, cada uno varía según el propósito del estudio, ya sea para determinar fertilidad, salinidad o clasificación de suelos. Sin embargo también existen diferentes tipos de análisis, como lo son los físicos, químicos y microbiológicos. El tipo de análisis depende del tipo de estudios que se desee hacer, por ejemplo las determinaciones físicas y químicas sirven para caracterizar o identificar algún problema y saber si requiere del acondicionamiento mecánico o de la adición de algún nutrimento al suelo.

La metodología para la toma de muestras y análisis de suelos se diseñó con base en la Norma Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002) que Establece las Especificaciones de Fertilidad, Salinidad y Clasificación de Suelos, Estudio, Muestreo y Análisis.

En base a esta norma, el método utilizado para el presente trabajo fue para determinar fertilidad en suelos. Los análisis realizados en laboratorio, una vez obtenidas las muestras, fueron; Materia orgánica, humedad, densidad aparente, densidad real, espacio poroso, pH, carbón orgánico y cationes intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+).

El dato más relevante que se desea obtener para efectos del presente trabajo es el carbono orgánico total en suelos, el cual se determinó a través de la obtención de la materia orgánica. Sin embargo para brindar una mayor comprensión de la presencia y dinámicas del carbono, es necesario obtener otros datos que ayuden a justificar y relacionar los resultados. Por tal motivo es que se determinaron las diferentes variantes antes mencionadas.

5.1 Muestreo

Se muestrearon los suelos de tres parcelas de nopal, así como una parcela de maíz para realizar una comparación entre sí, todas dentro de la delegación Milpa Alta. En el total de las parcelas muestreadas se presentaban un manejo agrícola convencional, con fertilización química para el maíz y con cobertura orgánica (estiércol bovino) para nopal.

Las parcelas de nopal seleccionadas para el presente estudio cumplen con el manejo que recibe el resto de las parcelas de nopal a lo largo de la delegación Milpa Alta; aunque puede variar en frecuencia y proporción, todas las parcelas muestreadas reciben una cobertura de abono orgánico fresco, así como podas, además que cuentan con una producción intensivas.

Para la toma de muestras de suelo en los puntos seleccionados, cada parcela se dividió en diferentes secciones según el tamaño y forma de esta. Una vez seccionado las parcelas, se tomó una muestra de cada profundidad en la parte central de cada sección. Cada muestra recolectada fue analizada individualmente en el laboratorio.

5.2 Toma y manejo de muestras

Para realizar la toma de muestras del suelo cada punto se limpió inicialmente de restos orgánicos no degradados, dejando la tierra del suelo expuesta para empezar el procedimiento pertinente.

La toma de la muestra se realizó con la ayuda de una pala recta, efectuando una excavación en forma de cuadro, de 30 cm por lado y de 40 cm de profundidad. Una vez realizada la cepa y con la ayuda de otra pala recta de menor tamaño se tomaron las muestras a cada profundidad; la muestra de 0 a 20 centímetros de profundidad se tomó insertando la pala pequeña justo en los 20 cm de profundidad, con la pala mayor se cortó una fracción de suelo en forma de rebanada desde la parte de la superficie hasta los 20 cm donde se encontraba la pala pequeña insertada, procurando que la muestra

cayera sobre la pala pequeña para posteriormente depositarla en una bolsa de plástico previamente marcada.

La toma de la muestra a profundidad de 20 a 40 cm se realizó de manera similar, insertando la pala hasta los cuarenta cm y realizando un corte de los 20 a los 40 cm. Las muestras tomadas fueron de aproximadamente 1 kg de peso.

En total se recolectaron 20 muestras de suelo para parcelas de nopal; 10 para la profundidad de 0 a 20 cm y 10 de 20 a 40 cm. En la parcela de maíz se obtuvieron cuatro muestras, dos para profundidad de 0 a 20 cm y dos de 20 a 40 cm.



Figura 5.1 Toma de muestra en parcela de maíz (izquierda) y nopal (derecha)

5.3 Trabajo de laboratorio

Las muestras fueron almacenadas en una caja de cartón para su traslado al laboratorio donde se realizaron los análisis. El trabajo que a continuación se muestra fue llevado a cabo en el laboratorio de edafología de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco.

De las muestras obtenidas y colocadas en bolsas, se separaron 50 gr de cada una de ellas para la determinación de humedad y densidad aparente, el resto de la muestra fue secada bajo techo sobre una plancha de papel a temperatura ambiente durante cinco días. Una vez en el laboratorio las muestras pasaron por un tamizado previo antes de

que iniciaran los análisis químicos, se utilizó un tamiz con un diámetro de 5 mm de diámetro, el suelo tamizado se utilizó para los análisis físico-químicos. A continuación se muestran los tipos de análisis que se emplearon para la determinación de cada variante en laboratorios. Se dividen en análisis físicos y químicos.

5.3.1 Análisis físicos de suelos en laboratorio

Humedad

La determinación de humedad se realizó por el método gravimétrico, este se basa en la determinación de la cantidad de agua expresada en gramos que contiene una muestra de suelo. Esta masa de agua se referencia de la masa del suelo seco de la muestra. La determinación de la cantidad de agua se realiza mediante la diferencia en peso entre la masa del suelo húmedo y la masa del suelo seco. El suelo seco es aquel que fue secado en estufa a 105 C hasta un peso constante.

Densidad aparente

La densidad aparente del suelo es la relación entre la masa o peso del suelo seco (peso de la fase sólida) y el volumen total, incluyendo al espacio poroso. El método de la probeta es utilizado para determinar la densidad aparente del suelo. Este método utiliza muestras de suelo secas al aire, molidas y tamizadas. Se utiliza una probeta de volumen conocido donde se colocará la muestra de suelo, tras el procedimiento necesario se obtendrán dos valores para una muestra, siendo el resultado final la diferencia de estos dos primeros.

Densidad real

El método utilizado para la densidad real es el del picnómetro. La densidad real del suelo puede ser calculada a partir del conocimiento de dos parámetros; la masa y el volumen de cierta cantidad de suelo. La masa es determinada pesando directamente el suelo y el volumen de manera indirecta por el cálculo de la masa y la densidad del agua desplazada por la densidad del suelo.

Porosidad

La porosidad del suelo deriva de la reacción entre la densidad real y la densidad aparente, se expresa en porcentaje. El espacio poroso de un suelo es la parte del mismo que en su estado natural está ocupado por aire y/o agua, generalmente la estructura de un suelo está constituida por 50% materia sólida y 50% espacio poroso. El volumen de este espacio poroso depende mucho de la disposición de las partículas sólidas.

5.3.2 Análisis Químicos de suelos en laboratorio

Materia orgánica

La determinación de la materia orgánica se realizó a través del método de oxidación húmeda propuesta por Walkley y Black en 1934. Este método se basa en la oxidación del carbono orgánico del suelo por medio de una disolución de dicromato de potasio y el calor de reacción que se genera al mezclarla con ácido sulfúrico concentrado. Después de un cierto tiempo de espera la mezcla se diluye, se adiciona ácido fosfórico para evitar interferencias de Fe^{3+} y el dicromato residual es valorado con sulfato ferroso. Con este procedimiento se detecta entre un 70 y 84% del carbón orgánico total por lo que es necesario introducir un factor de corrección, el cual puede variar entre cada tipo de suelo. En los suelos de México se recomienda utilizar el factor 1.29 (1/0.77).

pH

EL método utilizado para esta medición es el electrométrico, donde el pH del suelo es medido en una solución de agua pura. La evaluación electrométrica del suelo se basa en la determinación de la actividad del ion H mediante el uso de un electrodo cuya membrana es sensitiva al H. en el caso de los suelos el pH se mide con el potenciómetro en la suspensión sobrenadante de una mezcla de relación suelo-agua 1:2.

El pH es una de las mediciones más comunes e importantes en los análisis químicos rutinarios de suelos, ya que controla las reacciones químicas y biológicas en el suelo. La determinación de pH es afectada por varios factores como: el tipo y cantidad de constituyentes orgánicos e inorgánicos que contribuyen a la acidez del suelo, la concentración de sales en la solución, la reacción del suelo.

Ca²⁺ y Mg²⁺ intercambiables

La determinación se realizó por el método del Versenato. El procedimiento consiste en la lixiviación de los cationes intercambiables y su valoración por titulación con Versenato (EDTA). Dicha valoración está basada en la formación de un complejo colorido a partir de la reacción del versenato con los cationes calcio y magnesio presentes en la solución en condiciones alcalinas (pH=9); este pH se obtiene mediante una solución buffer. El fin de la reacción de formación del complejo colorido lo determina el vire del indicador negro de eriocromo T. Si el medio es fuertemente alcalino (pH=12) que se logra al agregar hidróxido de sodio (NaOH) al 12% el versenato sólo reacciona con el calcio, formando otro complejo cuya reacción completa se hace evidente por el cambio del indicador murexida.

El calcio es uno de los principales componentes de la litosfera y ocupa el quinto lugar en abundancia entre otros elementos. Por su alta capacidad de combinación con todos los ácidos conocidos forma un vasto número de compuestos, por cuya razón no se encuentra en estado elemental. Asimismo, este elemento constituye un macronutriente esencial para las plantas y algunos microorganismos. Algunas de sus funciones en suelos son: neutralizar acidez en suelos, mejora estructura y agregados en suelos, reduce la movilidad de compuestos tóxicos, aumenta la viabilidad de las bacterias fijadoras de nitrógeno y aniquila a los microorganismos nocivos para las plantas, etc.

El magnesio casi siempre se encuentra asociado al calcio y constituye el segundo catión intercambiable por su concentración en los suelos. El magnesio es también un macronutriente esencial para las plantas, presentando funciones similares a las del

calcio en el suelo. En las plantas forma parte de la molécula de clorofila, influyendo directamente en la fotosíntesis y en la productividad de los cultivos.

Sodio (Na⁺) y potasio (K⁺) intercambiables

Espectrofotometría de emisión por flama es el método que se utiliza para esta determinación. La flamometría se emplea principalmente para sodio y potasio, porque sus átomos se excitan fácilmente, pero también pueden medir Calcio, Magnesio, Cesio y Litio, entre otros.

En el espectrofotómetro de emisión, la muestra en solución pasa por una flama donde los átomos por el calor son dispersados y excitados, emitiendo una luz de longitud de onda específica. El espectrofotómetro cuenta con una celda fotoeléctrica para medir la intensidad de emisión, dentro de un intervalo de longitud de onda seleccionado, que corresponde a un determinado elemento.

Las soluciones con más alta concentración del elemento de interés, producen o emiten una mayor cantidad de luz cuando pasan por la flama. La cantidad de luz producida se relaciona con la concentración de la solución a través de una curva de calibración, de la misma manera como se procede en otros métodos espectrofotométricos. Los métodos de análisis específicos se presentan en el anexo.

5.4 Análisis estadístico

El análisis estadístico que se realizó para este trabajo de investigación, fue en la parte inicial de la aplicación de una prueba de t de Student, con la cual se realizó la comparación de las medias de dos variables. Este primer análisis se realizó para comparar las medias de los niveles de carbono orgánico entre los diferentes cultivos.

Posteriormente se utilizó un análisis de varianza (ANOVA) para la comparación de las medias de diferentes variables con las que se trabajó. La ANOVA permite determinar si

los diferentes tratamientos muestran diferencias significativas, o por el contrario puede suponerse que sus medias poblacionales no difieren. El análisis estadístico se realizará con Excel y el programa estadístico llamado “Sistema estadístico de triturador de números”, NCSS por sus siglas en inglés.

5.5 Preguntas de investigación

-¿De acuerdo al manejo tradición al que reciben los suelos del cultivo de nopal verdura de la delegación Milpa Alta, se pueden considerar estos suelos como sumideros de carbono?

-¿De acuerdo a los volúmenes de fertilizantes orgánicos utilizados y producción de biomasa, qué tipo de beneficios ambientales genera esta actividad agrícola?

5.6 Hipótesis

El manejo que reciben los suelos del cultivo de nopal verdura de la delegación Milpa Alta hace que esta actividad agrícola sea capaz de prestar servicios ambientales debido a su posible retención de carbono en los suelos.

5.7 Objetivos

General

-Evaluar el contenido de carbono en suelos de cultivo de nopal verdura (*Opuntia ficus-indica* L.).

Particulares

-Evaluar el nivel de contenido de carbono que se tiene en suelos de nopaleras de la delegación Milpa Alta en comparación a un cultivo tradicional de maíz en la misma zona.

-Evaluar los valores físico-químicos del suelo de las parcelas y su relación con el carbono orgánico.

-Determinar los beneficios ambientales que la producción de nopal, en forma de captura de carbono en suelos, pueden representar.

CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En base a información de la FAO, la captura de carbono y el aumento de la materia orgánica del suelo tienen un impacto positivo sobre la fertilidad de los suelos. Se contraponen al proceso de desertificación por medio del papel que juega el incremento de la materia orgánica sobre la estabilidad de la estructura y la retención de agua. La calidad del aire está principalmente relacionada con la disminución de la concentración del CO₂ atmosférico.

El uso de estiércol en los suelos de los cultivos agrícolas es uno de los manejos que más cantidades de materia orgánica aporta al suelo. Dicho manejo se ha recomendado como parte de una serie de acciones para detener la erosión y mejorar los suelos agrícolas, esto puede mejorar los rendimientos agrícolas, la estabilidad del suelo y el posible secuestro de carbono.

Los resultados que se muestran a continuación se presentan en tablas y figuras. Se presentan en tabla los valores del total de las variables y los datos obtenidos para suelo, materia orgánica y carbono orgánico total en los suelos de las parcelas muestreadas en la delegación Milpa Alta. Los análisis estadísticos realizados fueron ANOVA y t de Student.

La interacción entre los diferentes componentes del suelo determinan sus cualidades productivas, las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo son aspectos que integran lo que se conoce como la calidad de suelos, que en base a la definición de Jonh Duran citada por FAO (2015) es “la capacidad del suelo de funcionar, dentro de las fronteras del ecosistema y el uso de la tierra, manteniendo la calidad ambiental y fomentando el desarrollo de plantas, animales y el ser humano”. Para la realización del siguiente trabajo se muestran los resultados de los análisis físicos y químicos de los suelos de las parcelas, y la comparación de resultados entre cultivos.

6.1 Características fisiográficas de la parcela

Las parcelas de estudio se localizan en el área geográfica correspondientes a los pueblos de San Lorenzo Tlacoyuan y Santa Ana Tlacotenco de la delegación Milpa Alta. A pesar de que las parcelas de nopal presentan heterogeneidad en el suelo, cada una se encontraba bajo diferentes características mientras que la parcela de maíz era de temporal y contaba con fertilización química.

La parcela de nopal número uno se encuentra bajo las coordenadas de Latitud: 19°10'37.4"N, Longitud: 99° 1'34.4"O, con altura de 2619 msnm, contaba con una superficie de 2,000 m²aproximadamente y pendiente de 7%.

La parcela de nopal número dos se encuentra bajo las coordenadas de Latitud: 19°10'34.8"N, Longitud: 99°0'54.3"O, con altura de 2637 msnm, una superficie de 2,500 m² aproximadamente y pendiente de 5%.

La parcela de nopal número tres se encuentra bajo las coordenadas de Latitud: 19° 9'49.3"N, Longitud: 99° 2'40.3"O, con altura de 2835 msnm, una superficie de 1,000 m² aproximadamente y pendiente de 3%.

La parcela de maíz se encuentra bajo las coordenadas de Latitud de 19°10'33.15"N, Longitud: 99° 1'31.6"O, con altura de 2631 msnm, superficie de 2,000 m² aproximadamente y pendiente de 3%.

6.2 Propiedades físicas de los suelos de las parcelas

Las propiedades físicas del suelo determinan la capacidad de los usos a los que el hombre los sujeta. Factores como la capacidad de almacenamiento de agua o la retención de nutrientes se encuentran ligadas a las características físicas del suelo (UNAM, 2015).

6.2.1 Suelos a profundidad de 0 a 20 centímetros

Los datos obtenidos de las propiedades físicas del suelo de las parcelas a profundidad de 0 a 20 cm se indican en la tabla 6.1, posteriormente se describe cada propiedad.

Tabla 6.1. Propiedades físicas de los suelo de las parcelas de 0 a 20 de profundidad

Muestra		Propiedades físicas			
Cultivo	Prof. cm	Da gr/m ³	Dr gr/m ³	% Porosidad	% Hum
Nopal 1	0-20	1.0	2.2	55.51	23.47
Nopal 2	0-20	1.0	2.4	57.27	45.74
Nopal 3	0-20	0.7	2.0	64.01	52.47
Maíz	0-20	1.1	2.4	55.12	14.09

Densidad aparente en suelos de las parcelas

En la figura 6.1 se muestran los valores de densidad aparente de 0 a 20 cm de profundidad. Los valores para las parcelas de nopal son de 1, 1.02 y 0.73 en las parcelas 1, 2 y 3 respectivamente, el maíz reportó 1.07. Se destaca que el valor de Da más bajo coincide con la parcela que reportó mayores niveles de carbono orgánico, esto coincide con diferentes autores que encontraron que a mayores niveles de materia orgánica en suelos, los valores de Da disminuían (Núñez *et al* 2011, Jaurixje *et al* 2013).

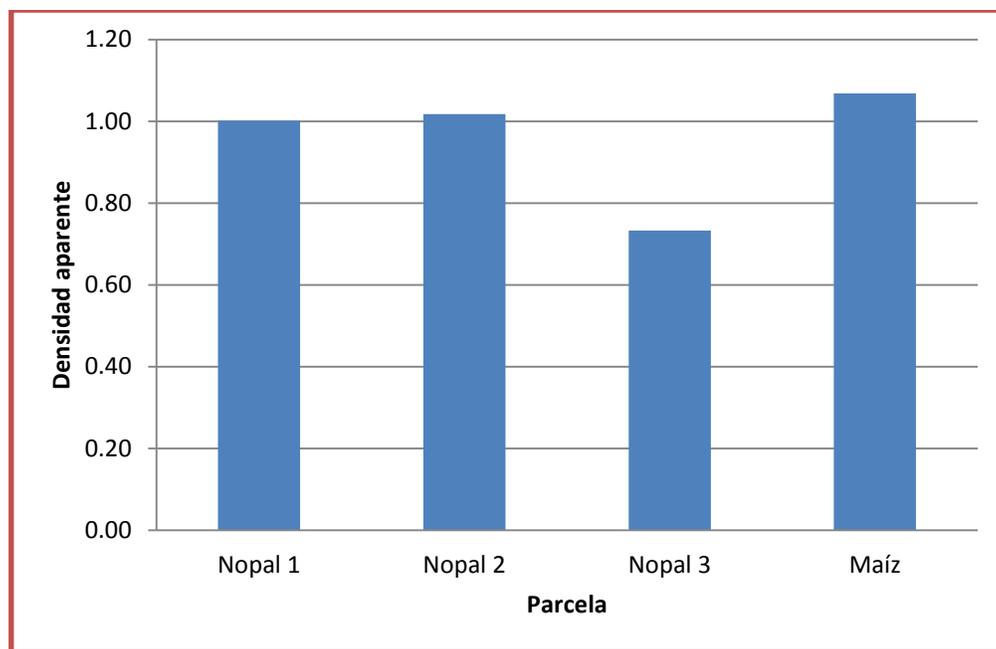


Figura 6.1. Densidad aparente para los suelos de las parcelas de nopal y maíz profundidad de 0 a 20 cm

Diversos autores (Núñez *et al* 2011, Alvarado *et al* 2013, Jaurixje *et al* 2013) indican que la densidad aparente se encuentra relacionada con los niveles de carbono orgánico. Núñez *et al* (2011) en un estudio en suelos forestales donde encontró que la adición de la materia orgánica proporcionada por la hojarasca del bosque durante 6 años logró disminuir el valor de D_a de 1.43 a 1.06 mg/m^3 .

Densidad real en suelos de las parcelas

La figura 6.2 señala los valores de la D_r para los suelos de las parcelas de nopal y maíz, las parcelas de nopal 1, 2 y 3 tuvieron un valor de 2.26, 2.38 y 2.04 respectivamente, para el maíz el valor fue de 2.38.

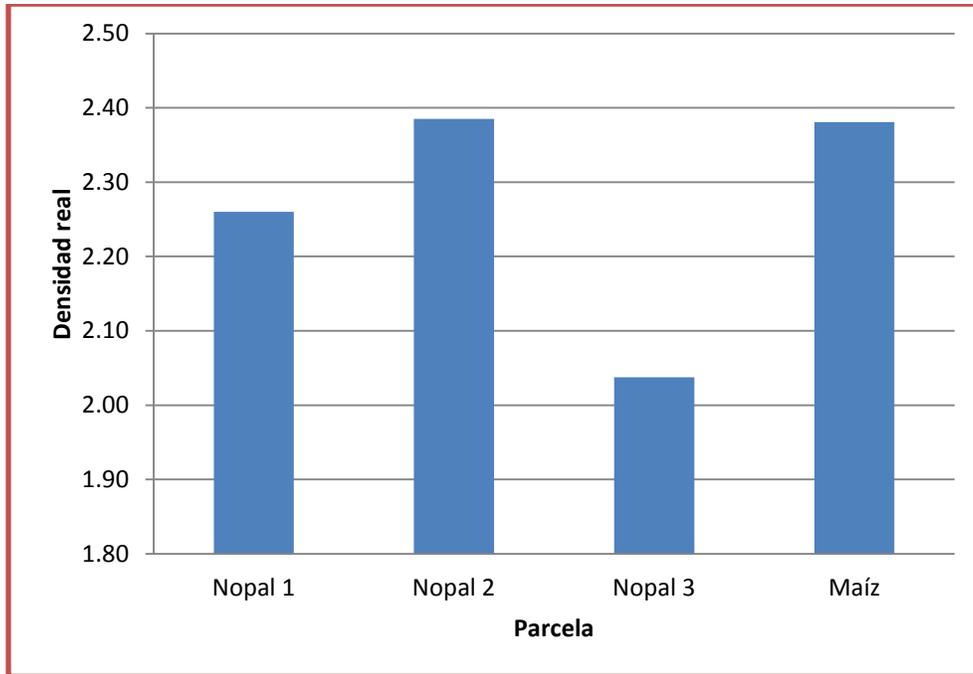


Figura 6.2. Densidad real para los suelos de las parcelas de nopal y maíz a profundidad de 0 a 20 cm

Los resultados coinciden con lo reportado por (Jaramillo 2002, Ramírez 2009), que para fines prácticos asumen un valor medio para la Dr de 2.65 g/cm^3 , ellos reportan que valores por debajo de este valor puede responder a la presencia de altos contenidos de materia orgánica, ya que debido a la escasa densidad que tiene, puede modificar el promedio.

Porosidad en suelos de las parcelas

La figura 6.3 muestra una disparidad entre los valores de la porosidad de las parcelas de nopal número 1 y 2 con la parcela 3. La parcela de nopal 1 resulta con un valor porcentual de 55.5; la parcela 2 con 57.2 y la parcela 3 con 64, en promedio el espacio poroso para las parcelas de nopal es de 58.9%. La parcela de maíz muestra un valor de 55.1%. Estadísticamente no se encontró diferencia significativa para los valores de espacio poroso de los suelos de las parcelas muestreadas ($P= 0.4167 \geq 0.05$) a profundidad de 0 a 20 cm.

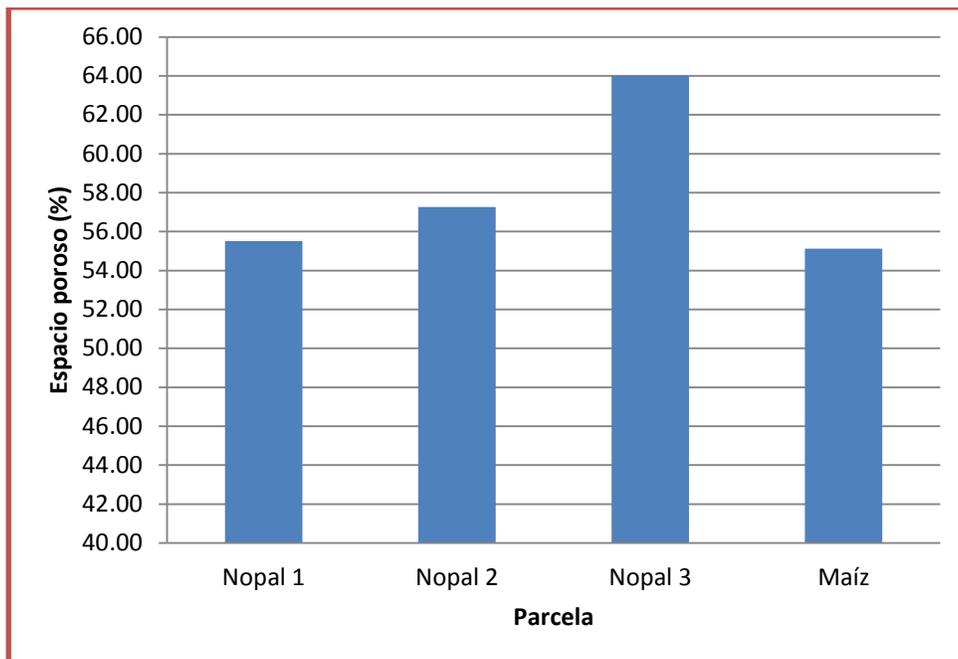


Figura 6.3. Espacio poroso para los suelos de las parcelas a profundidad de 0 a 20 cm

El espacio poroso del suelo se refiere al porcentaje del volumen del suelo no ocupado por sólidos. En general el volumen del suelo está constituido por 50% materiales sólidos (45% minerales y 5% materia orgánica) y 50% de espacio poroso (Jaramillo, 2002).

Tabla 6.2 clasificación de porosidad en base a Jaramillo a profundidad de 0 a 20 cm

Parcela	% E. Poroso	Jaramillo 2002
Parcela 1	55.51	Excelente
Parcela 2	57.27	Excelente
Parcela 3	64.01	Excelente
Maíz	55.12	Excelente

La porosidad mostrada en la tabla 6.2 se encuentra relacionada con los niveles de materia orgánica del suelo, por lo que los valores obtenidos en base a la clasificación de Jaramillo (2002) para la profundidad de 0 a 20 cm son excelentes para los suelos de todas las parcelas.

En base a información de FAO, la retención y disponibilidad de agua, gases y nutrientes se ven afectados por la estructura del suelo. Porosidad y retención de agua son dos parámetros que se encuentran estrechamente vinculados ya que la capacidad de retención de agua en el suelo es dependiente de la porosidad. A continuación se muestran los valores de humedad del suelo.

Humedad en suelos de las parcelas

La figura 6.4 muestra los porcentajes de humedad que mostraron las parcelas de nopal y maíz a profundidad de 0 a 20 cm. Las parcelas de nopal 1, 2 y 3 mostraron porcentajes de 23.5, 45.7 y 52.5, mientras que para la parcela de maíz fue de 14.

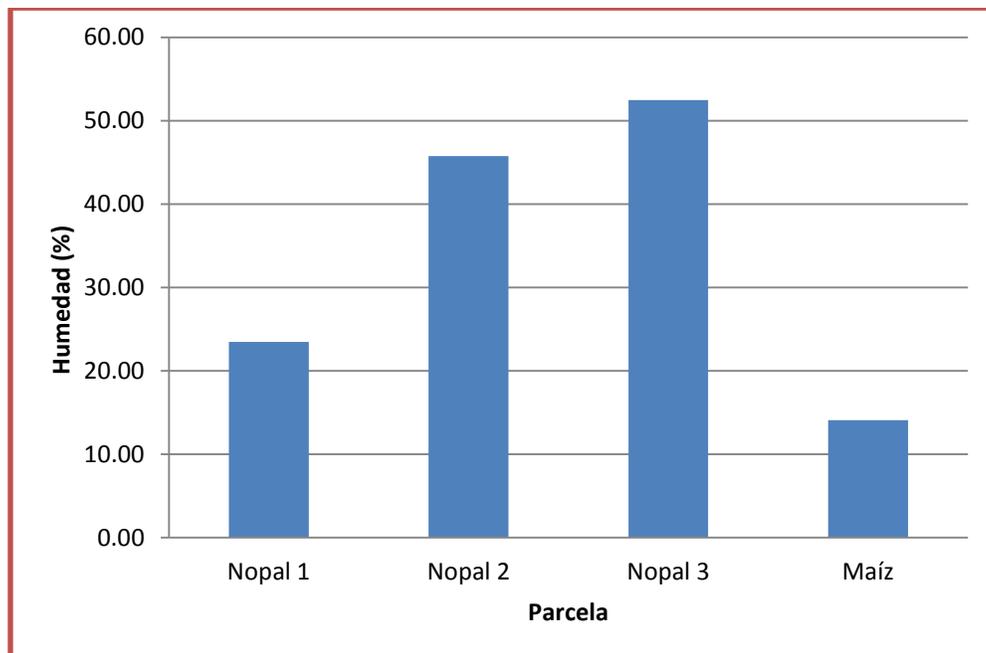


Figura 6.4. Humedad (%) para los suelos de las parcelas a profundidad de 0 a 20 cm.

Como se mencionó anteriormente, la porosidad y el contenido de humedad se encuentran estrechamente relacionados, esto se puede observar al comparar las figuras 6.3 y 6.4, donde se encuentra que existe una relación proporcional entre el valor de D_a y humedad. Martínez *et al* (2008) comenta que si bien la creación de poros de mayor tamaño da lugar a que se favorezca el paso del agua a través del perfil del suelo, el aumento global de la porosidad y la naturaleza coloidal de la materia orgánica hace que la capacidad del suelo para almacenar agua se vea muy favorecida, de manera que se protege a los cultivos tanto de la acción de las precipitaciones intensas (el exceso de agua drena mejor y la acción de la lluvia no daña a la estructura del suelo) como de la sequía.

6.2.2 Suelos a profundidad de 20 a 40 centímetros

La tabla 6.3 indica los datos obtenidos de las propiedades físicas del suelo de las parcelas a profundidad de 20 a 40 cm, posteriormente se describe cada propiedad.

Cabe destacar que la totalidad de los valores a esta segunda profundidad han reportado un impacto negativo, esto se debe principalmente a la disminución de la materia orgánica. Ya que es sabido que a mayor profundidad del suelo, la materia orgánica disminuye.

Tabla 6.3. Propiedades físicas de los suelo de las parcelas de 20 a 40 de profundidad

Muestra		Propiedades físicas			
Cultivo	Prof. cm	D_a gr/m ³	D_r gr/m ³	% Porosidad	% Hum
Nopal 1	20-40	1.1	2.4	51.66	19.94
Nopal 2	20-40	1.1	2.4	55.89	36.89
Nopal 3	20-40	0.8	2.2	62.75	49.72

Densidad aparente en suelos de las parcelas

La figura 6.5 muestra un mínimo aumento en el valor de Da a profundidad de 20 a 40 cm para todas las parcelas. Los suelos de las parcelas de nopal reportaron valores de Da de 1.15, 1.05 y 0.84 para las parcelas 1, 2 y 3 respectivamente. La parcela de maíz reportó 1.16. El aumento del valor de Da a mayor profundidad es debido a que se encuentra menor cantidad de materia orgánica (UNAM, 2015). El aumento de la Da de la parcela de maíz responde principalmente al volteo que el suelo recibe como parte del manejo que recibe este tipo de cultivo. La parte superior del suelo puede quedar una zona más profunda y viceversa, esto se refuerza al saber, en base a lo dicho por el productor, que la parcela había sido laboreada hacia un par de semanas.

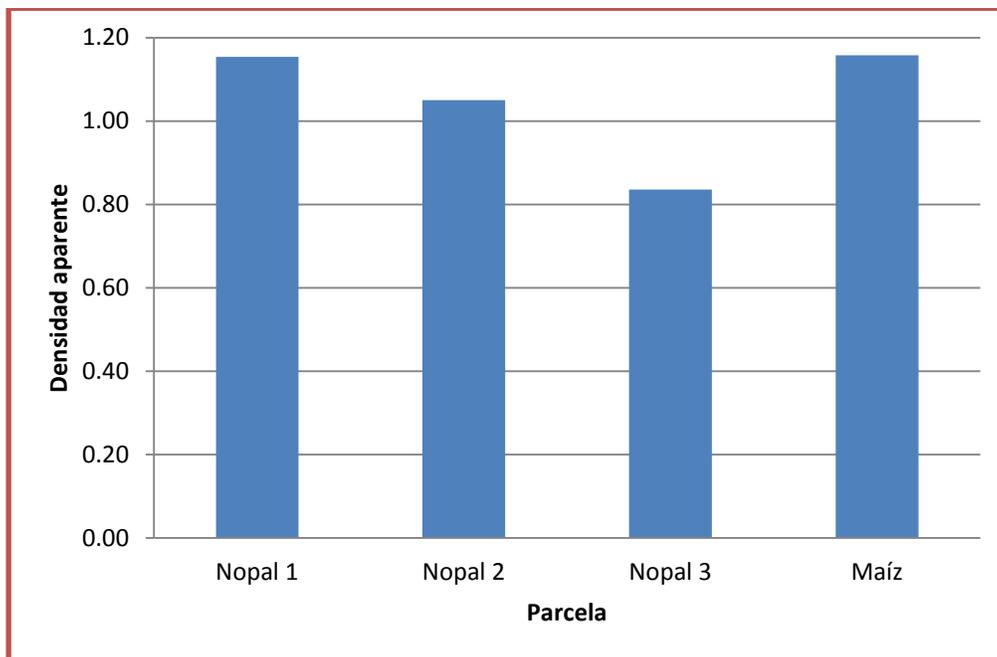


Figura 6.5. Densidad aparente para los suelos de las parcelas de nopal y maíz profundidad 20 a 40 cm

Densidad real en suelos de las parcelas

La figura 6.6 indica los valores de D_r en los suelos de los cultivos de nopal y maíz a profundidad de 20 a 40 cm. Los valores para las parcelas de nopal 1, 2 y 3 fueron de 2.39, 2.38 y 2.24, la parcela de maíz reportó 2.42. Nótese que la parcela 2 de nopal se mantuvo con el mismo valor, para el resto se encontró un aumento en el valor de D_r .

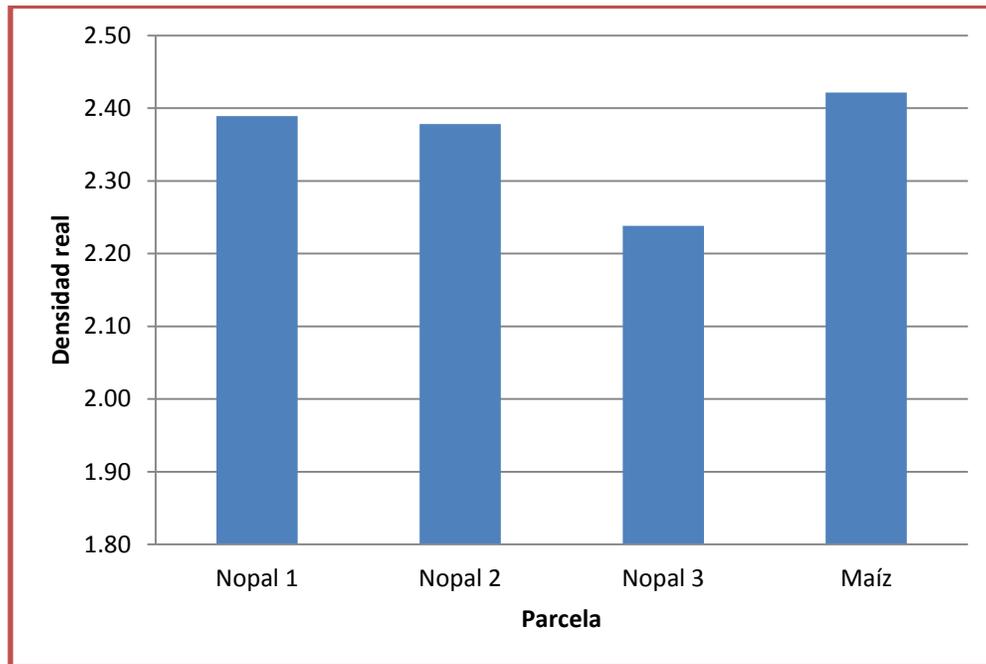


Figura 6.6. Densidad real para los suelos de las parcelas de nopal y maíz a profundidad de 20 a 40 cm

El aumento del valor de densidad real probablemente responda a menores cantidades de materia orgánica que se encuentran a mayor profundidad, esto coincide con Buckman y Brady (1966), citado por Huerta (2010), Los cuales mencionan que los suelos superficiales poseen menores valores de D_r que el subsuelo debido a los mayores niveles de materia orgánica que contienen.

Porosidad en suelos de las parcelas

Figura 6.7 Se muestra el porcentaje del espacio poroso presentes en los suelos de los cultivos a profundidad de 20 a 40 cm. Destaca que el espacio poroso disminuye a mayor profundidad para el caso de las parcelas de nopal y para la parcela de maíz

aumenta. Para el nopal, la parcela 1 obtuvo un 51.6%; la parcela 2 obtuvo 54.8% y la parcela 3 con 53.7%. El promedio de espacio poroso para las parcelas de nopal fue de 53.36. La parcela de maíz obtuvo un valor de 62.7%. Para la profundidad de 20 a 40 centímetros sí se encontró diferencia significativa para los valores de espacio poroso ($P= 0.0460 \leq 0.05$).

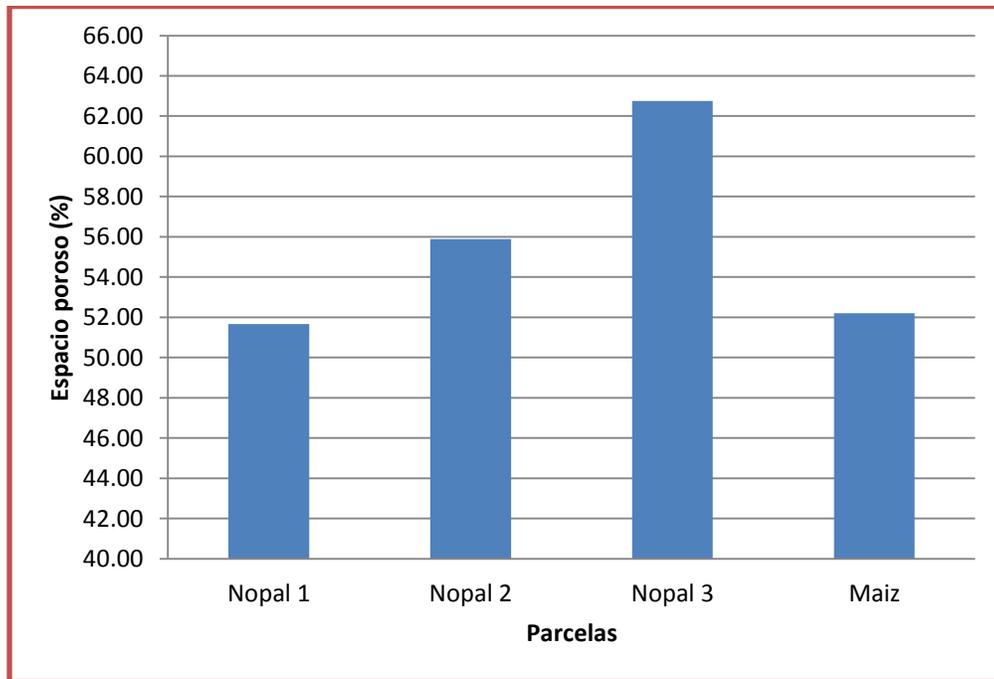


Figura 6.7. Espacio poroso para los suelos de Las parcelas a profundidad de 20 a 40 cm.

Tabla 6.4 clasificación de porosidad en base a Jaramillo a profundidad de 20 a 40 cm

Parcela	% E. Poroso	Jaramillo 2002
Profundidad de 20 a 40 cm		
Parcela 1	51.66	Satisfactoria
Parcela 2	55.89	Excelente
Parcela 3	62.75	Excelente
Maíz	52.20	Satisfactoria

Jaramillo (2002) comenta que teóricamente se acepta una buena como buena una porosidad total promedio de 50%. La tabla de clasificación tiene un rango de 50 a 55% como satisfactorio y de 55 a 70% como excelente. Los valores obtenidos al ser mayores del 55%, alcanzan el valor de excelencia. En base a esta clasificación los resultados a profundidad de 20 a 40 cm son satisfactorios para la parcela de nopal número 1 y maíz, y excelente para las parcelas número 2 y 3.

La tabla 6.4 indica valores obtenidos en base a la clasificación de Jaramillo (2002) para la profundidad de 20 a 40, varían de satisfactorio a excelente.

Humedades suelos de las parcelas

La figura 6.8 indica los porcentajes de humedad a profundidad de 20 a 40 cm. Los valores de las parcelas de nopal son de 19.9, 6.9 y 50 para las parcelas número 1, 2 y 3 respectivamente, la parcela de maíz obtuvo un valor de 18.

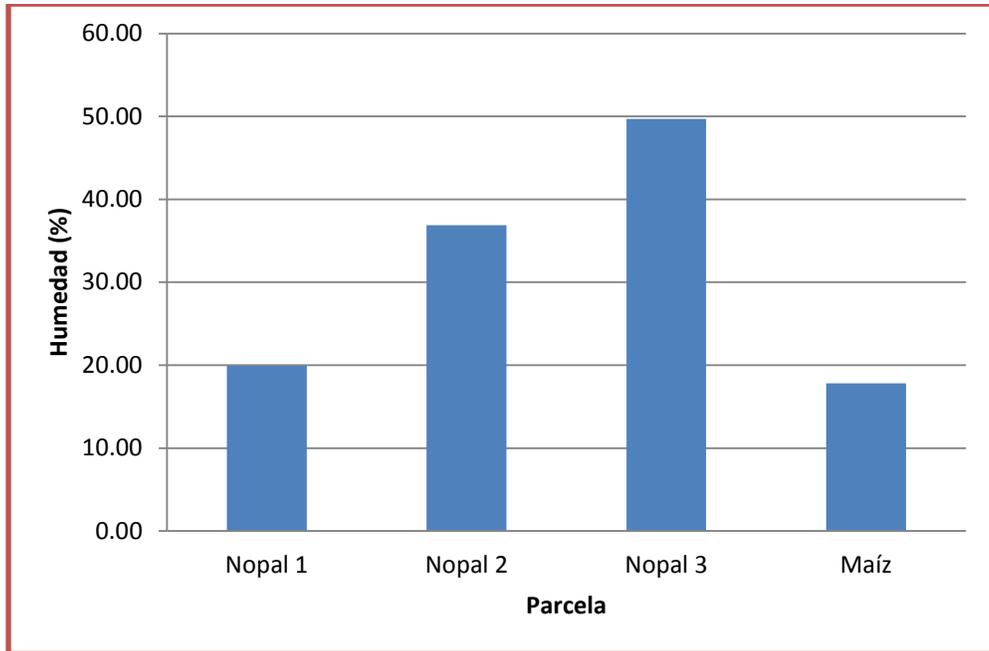


Figura 6.8. Humedad (%) para los suelos de las parcelas a profundidad de 20 a 40 cm.

Las parcelas de nopal reportaron una ligera disminución en los porcentajes de humedad conforme aumentó la profundidad, esto responde a la humedad que el estiércol es capaz de retener y que influye en la zona más superficial.

6.3 Propiedades químicas de los suelos de las parcelas

6.3.1 Suelos a profundidad de 0 a 20 centímetros

Los datos obtenidos de las propiedades químicas del suelo de las parcelas a profundidad de 0 a 20 cm se indican en la tabla 6.5, posteriormente se describe cada propiedad. Los resultados de materia orgánica, carbono orgánico y toneladas por hectárea de carbono orgánico del suelo, se discutirán en el punto 6.4.

Tabla 6.5. Propiedades químicas de los suelo de las parcelas de 0 a 20 de profundidad

Muestra		Propiedades Químicas							
Cultivo	Prof. cm	% MOS	% COS	COS Ton/ha	pH	Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺
Nopal 1	0-20	9.25	5.36	107.36	6.7	10.87	5.17	30.76	43.04
Nopal 2	0-20	8.5	4.93	100.38	7.3	13.62	2.74	25.67	53.86
Nopal 3	0-20	12.94	7.51	110	7.3	10.76	2.63	42.14	57.00
Maíz	0-20	5.87	3.4	72.69	6.2	2.39	1.54	9.25	23.03

pH en suelos de parcelas

Los valores de pH para las diferentes parcelas muestreadas a cada una de las profundidades se muestran en las siguientes figuras. El pH se encuentra relacionado con la disponibilidad de nutrientes. El valor de pH se encuentra dado entre los números 0 y 14, el 7 se considera como un valor neutral. El pH abajo del 7 se considera ácido y entre más se acerque al 0 más ácido será. Valores por encima del 7 se consideran alcalinos y más fuerte alcalinidad tendrá entre más se acerque al 14. La figura 5 muestra los valores de pH de las parcelas muestreadas a profundidad de 0 a 20 cm.

La figura 6.9 muestra valores de pH ligeramente mayores para los suelos de las parcelas de nopal. Las parcelas de nopal muestran valores de 6.69 para la parcela 1; 7.31 para la parcela 2 y 7.3 para la parcela 3, con un promedio en el pH de 7.1. Mientras la parcela de maíz obtuvo un resultado de 6.24. Estadísticamente se encontró que no existía diferencia significativa para los valores de pH de las parcelas muestreadas ($P= 0.2232 \geq 0.05$) a profundidad de 20 a 40 cm.

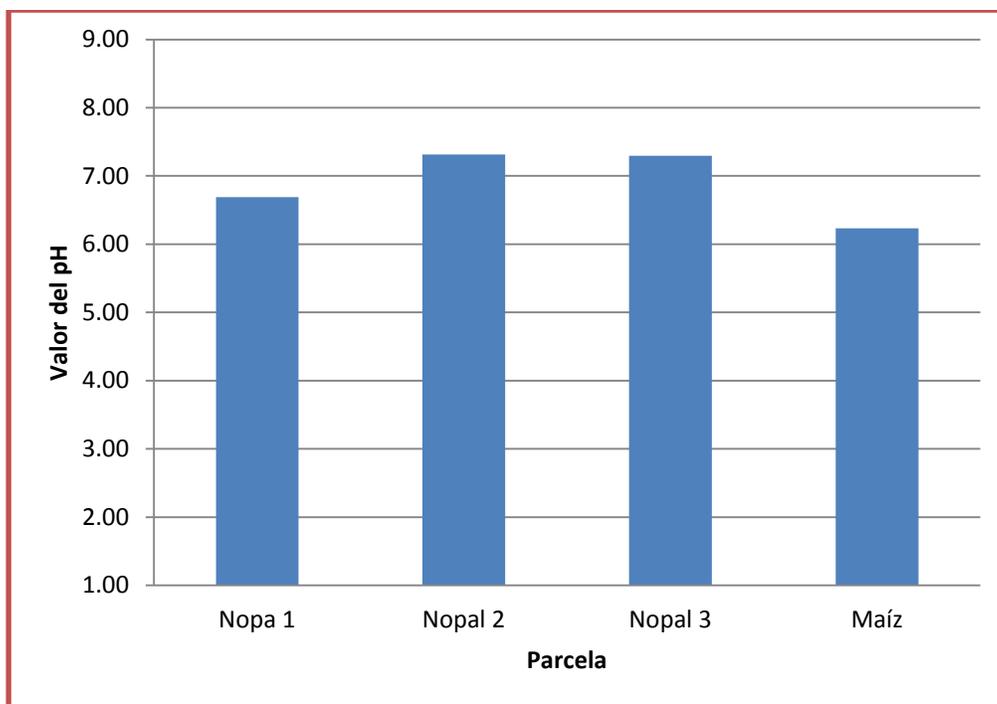


Figura 6.9. Valor de pH para los suelos de las parcelas de nopal y maíz profundidad de 0 a 20 cm

Tabla 6.6. Valores de pH de los suelos de las parcelas de nopal y de la maíz a profundidad de 0 a 20 centímetros, y su valor según Moreno (1978).

Profundidad de 0 a 20 cm		
Parcela	pH	clasificación Moreno 1978
Parcela 1	6.69	Muy ligeramente ácido
Parcela 2	7.31	Muy ligeramente alcalino
Parcela 3	7.30	Muy ligeramente alcalino
Maíz	6.24	Ligeramente ácido

Los valores para el pH a profundidad de 0 a 20 cm varían, en base a Moreno (1989), entre ligeramente ácido a muy ligeramente alcalino (tabla 6.6). Los valores obtenidos para todas las parcelas son aceptables, pues los niveles de pH ideales para la producción agrícola tienden a ligeramente ácidos a neutral, esto se ve reflejado en las parcelas de nopal 1 y de maíz. La razón de los valores de pH pueden estar asociadas a la presencia de materia orgánica pues Martínez *et al* (2008) comenta que dicho comportamiento del pH es característico ante la presencia de materia orgánica en el suelo, la cual al descomponerse forma ácidos débiles que tienden a bajar el pH de suelo. Sin embargo y también a la presencia de cationes básicos en la MOS, el suelo se puede neutralizar e inclusive, tornarlo ligeramente básicos, probablemente este sea el motivo por el cual las parcelas 2 y 3, mostraran valores ligeramente alcalinos.

Jiménez *et al* (2004) concluyeron que el pH se incrementa con la adición de estiércol bovino en suelos. Sin embargo Trejo *et al* (2013) reportaron un ligero aun de pH en 10 años de aplicación de estiércol bovino, pero reportaron variaciones en los valores entre los años de experimentación, teniendo valores que iban de entre 6.7 hasta 8.35 de pH.

Bases intercambiables

Sodio (Na⁺) en suelos de las parcelas

Los niveles de sodio son considerablemente más altos en las parcelas de nopal. En base a la clasificación de Rioja (2002) los niveles de sodio en el suelo de nopal, exceden por mucho el tope de la clasificación que es mayor a 1.5 (meq/100g). Incluso la parcela de nopal se encuentra por encima de este nivel. Las parcelas de nopal son influenciadas por los altos contenidos de estiércol bovino, el cual contiene grandes cantidades de Na en su parte líquida (Salazar *et al*, 2010).

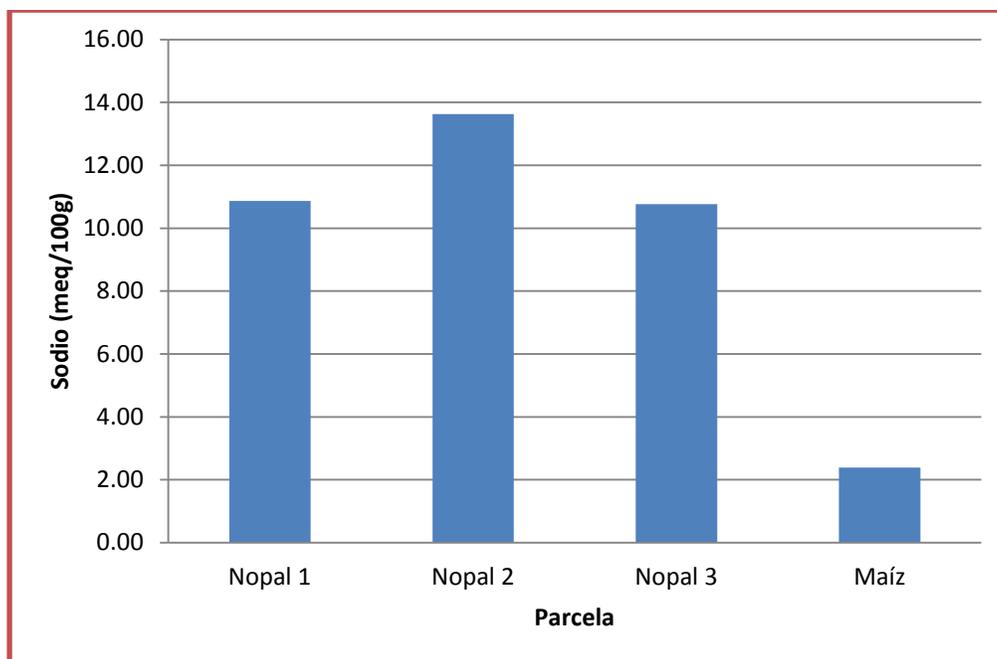


Figura 6.10. Niveles de sodio para los suelos de las parcelas de nopal y maíz profundidad de 0 a 20 cm.

Potasio (K⁺) en suelos de las parcelas

Los niveles de potasio se encuentran para las parcelas de nopal, en base a la clasificación de Rioja (2002), en un valor muy alto, sin embargo la parcela de nopal 1 excede a casi el doble el rango de esta clasificación. De manera general el alto contenido de potasio presente en la fracción líquida del estiércol puede ser la causante de los altos valores de potasio (Salazar *et al*, 2010). La parcela de maíz se encuentra en base a la misma clasificación en un nivel alto.

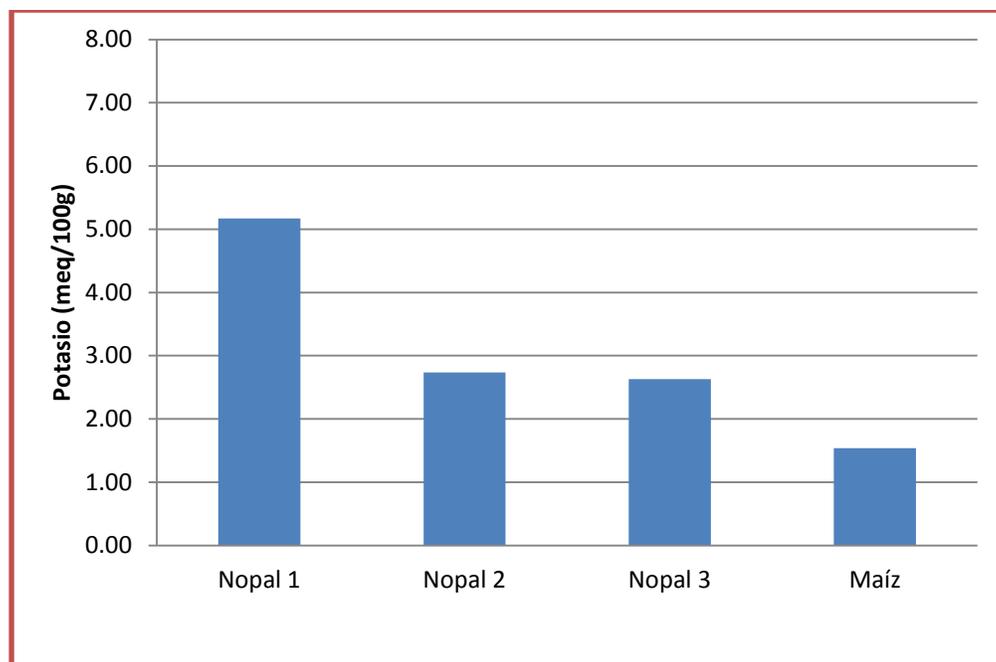


Figura 6.11. Niveles de Potasio para los suelos de las parcelas de nopal y maíz profundidad de 0 a 20 cm.

Magnesio (Mg^{++}) en suelos de las parcelas

El magnesio (Mg) casi siempre se encuentra asociado al calcio y constituye el segundo catión intercambiable por su concentración en los suelos. El magnesio es también un macronutriente esencial para las plantas, presentando funciones similares a las del calcio en el suelo. En las plantas forma parte de la molécula de clorofila, influyendo directamente en la fotosíntesis y en la productividad de los cultivos (UNAM, 2015).

En base a la clasificación de Rioja (2002) el magnesio tiene valores exorbitantes para las parcelas de nopal e inclusive de maíz. Lizcano (2006), comenta que los suelos de origen volcánico tienden a tener una mayor cantidad de minerales, donde destaca el calcio y magnesio, esto junto a la gran adición de estiércol orgánico puede dar origen a dichos valores. La parcela de maíz puede estar respondiendo a las características de los suelos volcánicos al encontrarse en un valor muy alto.

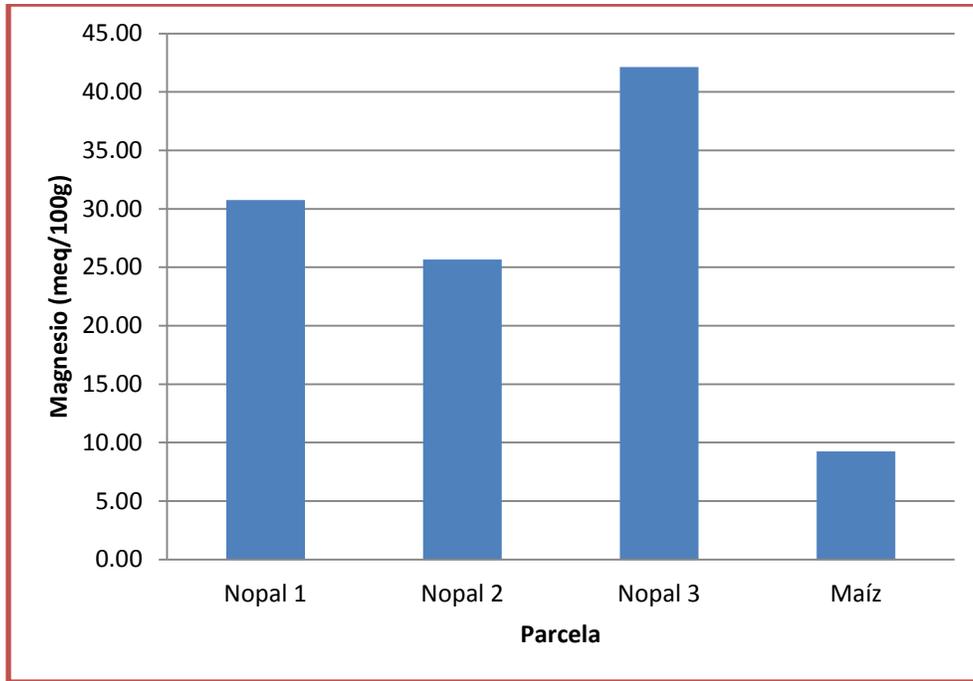


Figura 6.12. Niveles de magnesio para los suelos de las parcelas de nopal y maíz profundidad de 0 a 20 cm.

Calcio (Ca⁺⁺) en suelos de las parcelas

El calcio (Ca⁺⁺) constituye un macronutriente esencial para las plantas y algunos microorganismos. Algunas de sus funciones en suelos son: neutralizar acidez en suelos, mejora estructura y agregados en suelos, reduce la movilidad de compuestos tóxicos, aumenta la viabilidad de las bacterias fijadoras de nitrógeno y aniquila a los microorganismos nocivos para las plantas, etc. (UNAM, 2015).

Un comportamiento similar al del magnesio reporta el calcio, pues los valores para los suelos de las nopaleras exceden en promedio el doble. Los valores se atribuyen a los suelos de origen volcánico y a alta adición de estiércol. El maíz se encuentra en un valor muy alto, posiblemente por el origen del suelo.

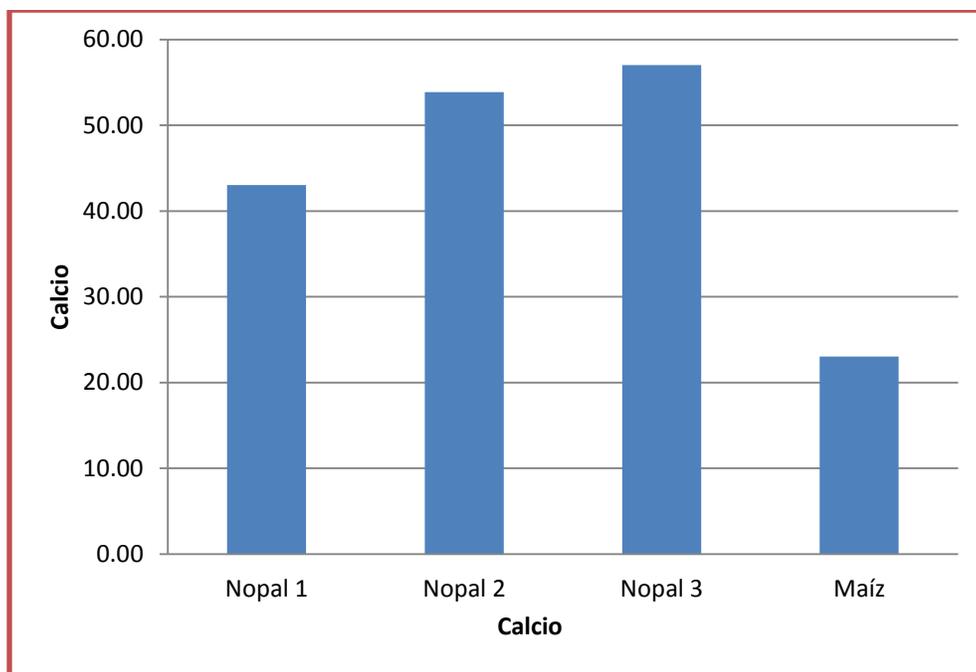


Figura 6.13. Niveles de calcio para los suelos de las parcelas de nopal y maíz profundidad de 0 a 20 cm.

6.3.2 Suelos a profundidad de 20 a 40 centímetros

Tabla 6.7. Propiedades químicas de los suelo de las parcelas de 0 a 20 de profundidad

Muestra		Propiedades químicas							
						Sodio-potasio Meq/100		Calcio-magnesio Meq/100	
Cultivo	Prof. cm	% MOS	% COS	COS Ton/ha	pH	Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺
Nopal 1	20-40	6.27	3.63	83.87	6.3	6.81	6.24	5.80	17.37
Nopal 2	20-40	5.99	3.47	72.95	6.8	14.49	7.56	19.31	28.44
Nopal 3	20-40	8.47	4.91	82.12	7.3	10.00	2.76	11.00	24.16
Maíz	20-40	5.7	3.31	76.53	6.2	2.28	1.09	12.34	31.33

pH en suelos de las parcelas

La figura 6.14 muestra los valores de pH a profundidad de 20 a 40 cm. Las parcelas de nopal 1 y 2 mostraron variaciones respecto a sus valores anteriores con 6.3 y 6.8 respectivamente, la parcela de nopal número 3 mantuvo su valor de 7.3, el promedio de las parcelas de nopal fue de 6.83. El suelo de la parcela de maíz prácticamente permaneció con el mismo valor de 6.27. Estadísticamente, no se encontró diferencia significativa de los valores de pH ($P= 0.0655 \geq 0.05$) para profundidad de 20 a 40 cm.

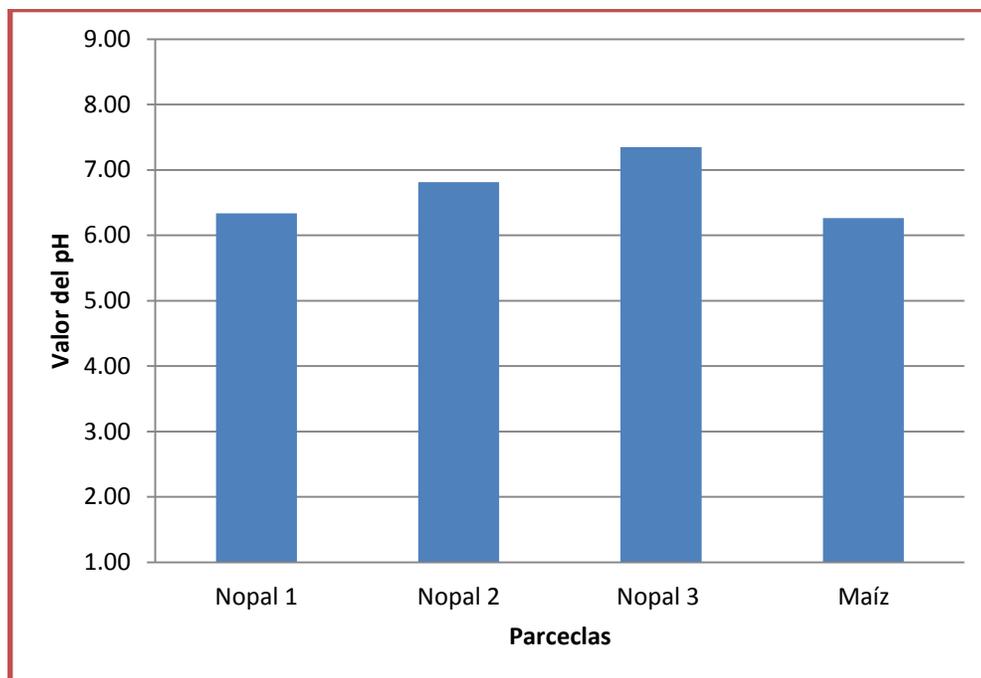


Figura 6.14. Valor de pH para los suelos de las parcelas de nopal y maíz profundidad de 20 a 40 cm.

Tabla 6.8. Valores de pH de los suelos de las parcelas de nopal y de maíz a profundidad de 20 a 40 centímetros, y su valor según Moreno (1978).

Profundidad de 20 a 40 cm		
Parcela	pH	Moreno 1978
Parcela 1	6.34	Ligeramente ácido
Parcela 2	6.81	Muy Ligeramente ácido
Parcela 3	7.35	Muy ligeramente alcalino
Maíz	6.27	Ligeramente ácido

El pH a profundidad de 20 a 40 cm se encuentra entre ligeramente ácidos y muy ligeramente alcalino en base a la clasificación de Moreno, sin embargo se consideran dentro del rango de aceptables. Estos valores, al igual que en la medición de 0 a 20, se encuentran relacionados a los niveles de materia orgánica presentes en suelos.

El Instituto Nacional de Ecología y cambio climático (2015) indica que los valores de pH encontrados en las parcelas muestreadas, se encuentran dentro de los rangos óptimos en suelos para el buen desarrollo de las plantas de cada cultivo. El rango de pH óptimo para suelos de cultivos de nopal es entre 6.5 y 8.5. Para el maíz es entre 6 y 7.

Sodio (Na^{++}) en suelos de las parcelas

A esta profundidad cabe destacar que el comportamiento general de los suelos fue de reducir sus valores, esto debido a que a mayor profundidad menores cantidades de cationes intercambiables se encuentran. Lo cual coincide con lo reportado por Zetina *et al* (2005).

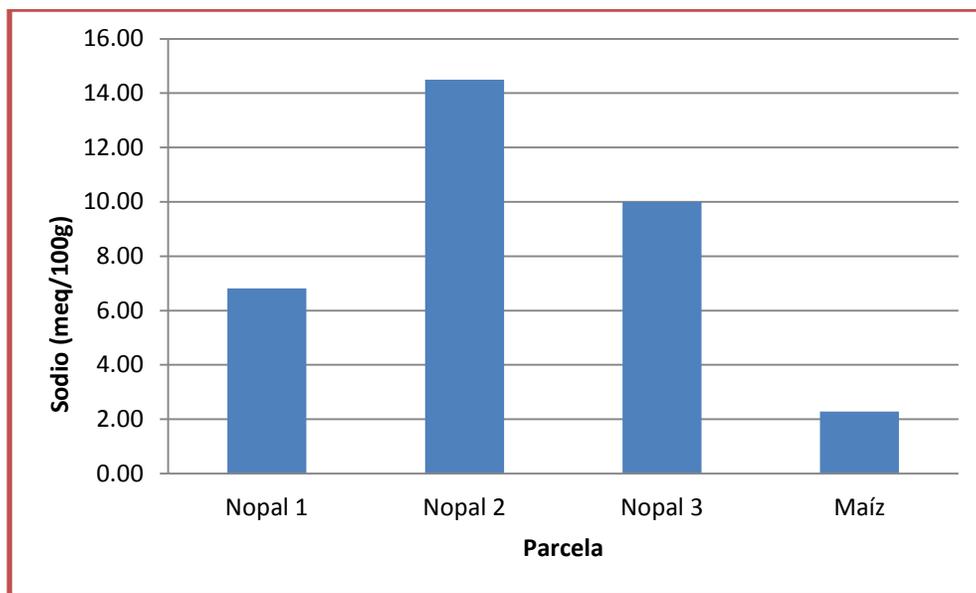


Figura 6.15. Niveles de Sodio para los suelos de las parcelas de nopal y maíz profundidad de 20 a 40 cm.

Potasio (K^+) en suelos de las parcelas

Los valores en los niveles de K en base a Rioja aumentaron a mayor profundidad, lo cual coincide con lo reportado por Carrizo *et al* (2011), el cual menciona que el alto contenido mineral del suelo y la posible lixiviación ocurrida en el suelo, lo cual se potencializa en el caso de los suelos de nopal por los altos contenidos de K presente en el estiércol aplicado al suelo.

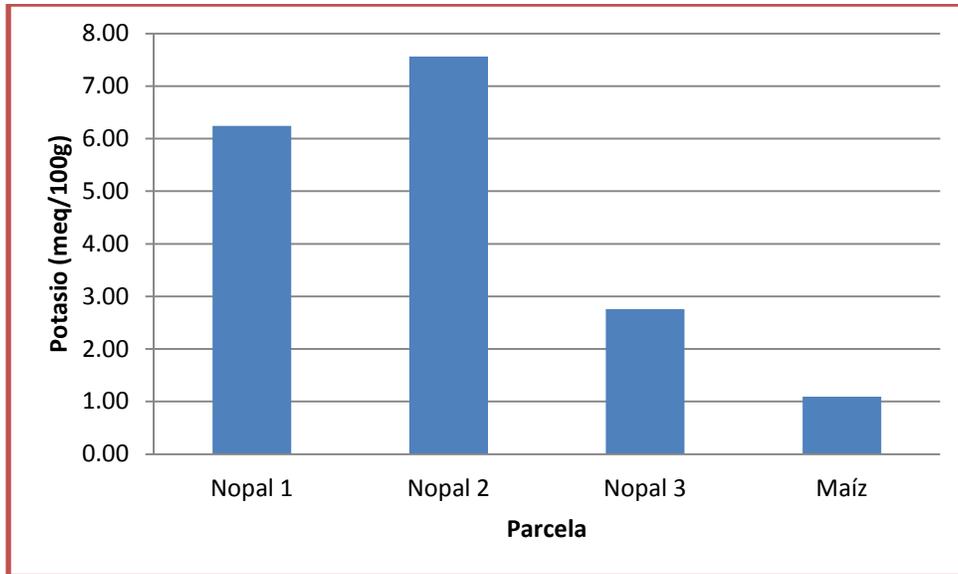


Figura 6.16. Niveles de Potasio para los suelos de las parcelas de nopal y maíz profundidad de 20 a 40 cm.

Magnesio (Mg⁺⁺) en suelos de las parcelas

A pesar que los valores del magnesio en base a la clasificación de Rioja (2002) siguen siendo muy altos, los resultados coinciden con Zetina *et al* (2005) al encontrarse menores cantidades de magnesio a mayor profundidad.

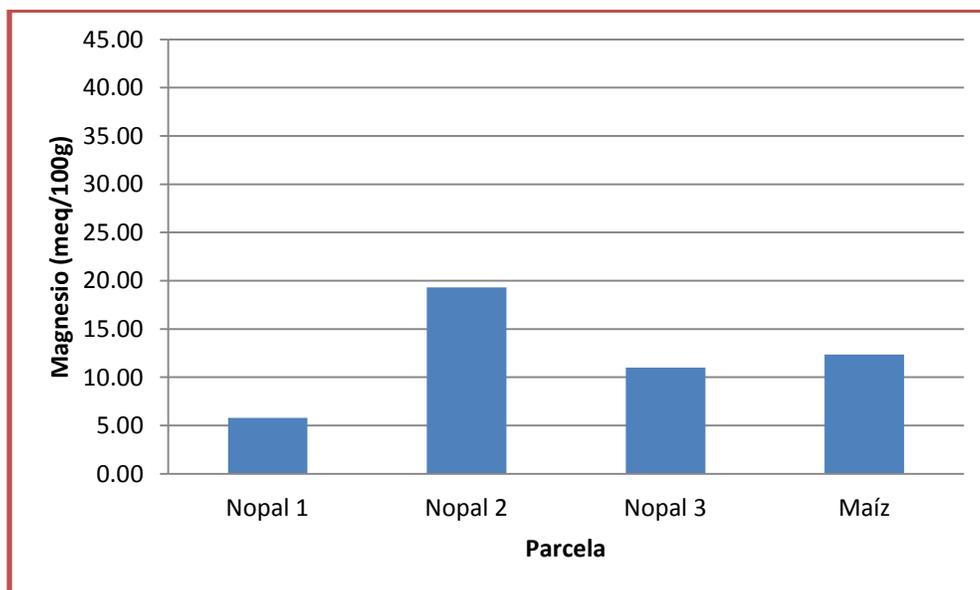


Figura 6.17. Niveles de Magnesio para los suelos de las parcelas de nopal y maíz profundidad de 20 a 40 cm.

Calcio (C⁺⁺) en suelos de las parcelas

El comportamiento del calcio fue el reportado por Zetina *et al* (2005) ya que a mayor profundidad se encontró menos nivel de calcio. En base a Rioja (2002) sólo la parcela de nopal 1 bajo hasta considerarse alto, el resto de las parcelas se encuentran con un valor muy alto.

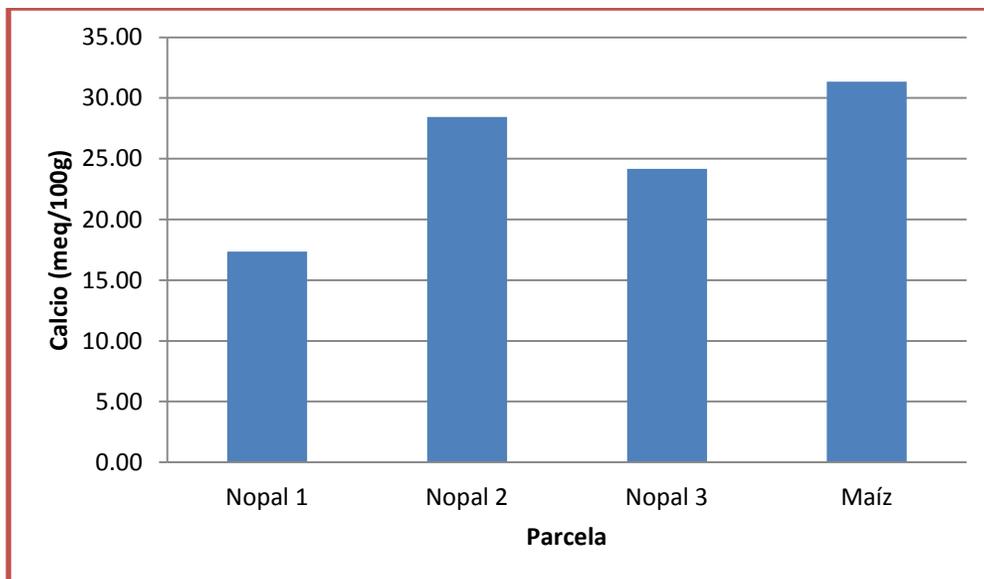


Figura 6.18. Niveles de calcio para los suelos de las parcelas de nopal y maíz profundidad de 20 a 40 cm.

6.4 Valores de carbono orgánico total en los suelos de las parcelas

La determinación del porcentaje de carbono orgánico del suelo (COS) se realizó a partir de la materia orgánica del suelo, partiendo del supuesto de que la materia orgánica contiene un 58% de carbono orgánico. Por tanto los valores de carbono orgánico que

se presentan se encuentran directamente relacionados con los niveles de materia orgánica en suelo.

6.4.1 Carbono orgánico total de las parcelas a profundidad de 0 a 20 centímetros

La Tabla 6.9 muestra los niveles de COS, a profundidad de 0 a 20 cm, que se presentan se encuentran expresados en toneladas por hectárea. Este valor se obtuvo a partir de la determinación del peso del suelo de cada parcela con la ayuda de los datos de densidad aparente y densidad real. Con esto se determinó el peso de una hectárea de suelo (10,000 m²) correspondiente a la parcela, teniendo en cuenta que los cálculos se realizan a una profundidad de 20 cm (ó 0.2 m). Posteriormente, del número de toneladas resultante de materia orgánica del suelo, se obtienen el valor correspondiente al carbono orgánico total (Vela *et al*, 2012).

Tabla 6.9. Materia orgánica y carbono orgánico total del suelo, proyectado a toneladas por hectárea

Profundidad 0 a 20 centímetros				
Parcela	Profundidad (cm)	Peso total del suelo por hectárea (ton)	Peso total de la MOS por ha (ton)	COS por ha (ton)
Nopal 1	0-20	2002	185.18	107.30
Nopal 2	0-20	2036	173.06	103.30
Nopal 3	0-20	1466	189.70	110.02
Maíz	0-20	2137	125.39	72.73

A continuación se muestran los valores de carbono orgánico total del suelo los cultivos de nopal y maíz a profundidades de 0 a 20 y de 20 a 40 centímetros.

La figura 6.19 señala los niveles de COS presente en las parcelas de nopal y la parcela de maíz muestreadas a profundidad de 0 a 20 centímetros. Los valores de las parcelas de nopal fueron para la parcela 1 de 107.3 ton/ha, la parcela 2 con 100.3 ton/ha y la parcela 3 con 110 ton/ha, con una media de 105.9 ton/ha. La parcela de maíz que arrojó un resultado de 72.7 toneladas por hectárea.

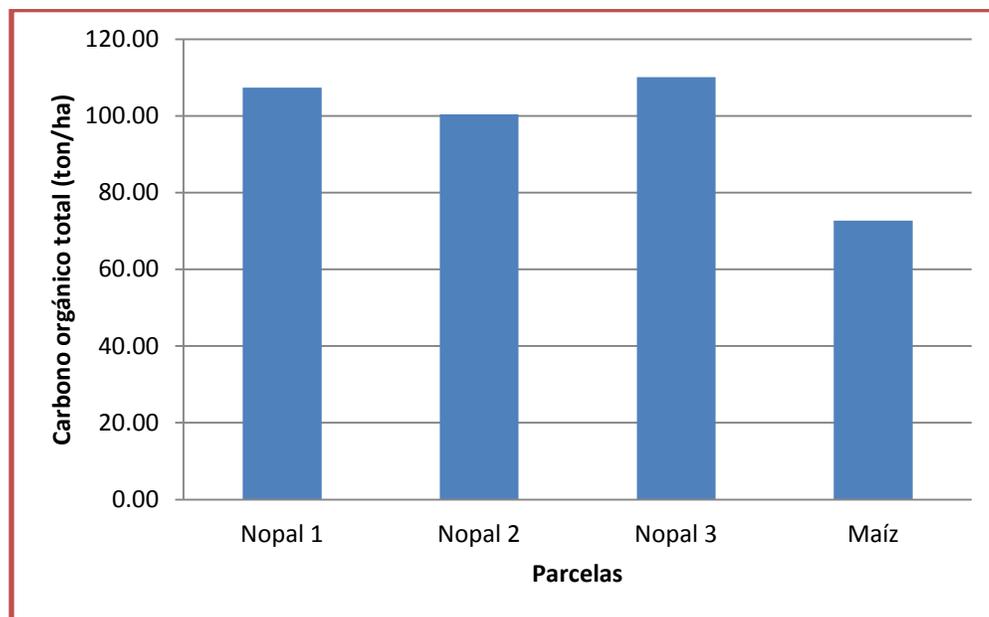


Figura 6.19 Valores de Carbono orgánico total en suelos de parcelas de nopal y maíz profundidad de 0 a 20 cm.

6.4.2 Carbono orgánico total de las parcelas a profundidad de 20 a 40 centímetros

Tabla 6.10. Materia orgánica y carbono orgánico total del suelo, proyectado a toneladas por hectárea

Profundidad 20 a 40 centímetros				
Parcela	Profundidad (cm)	Peso total del suelo por hectárea (ton)	Peso total de la MOS por ha (ton)	CO por ha (ton)
1	20-40	2308	144.71	83.85
2	20-40	2100	125.88	72.95
3	20-40	1671	141.53	82.10
Maíz	20-40	2315	131.9	76.53

La Tabla 6.10 muestra los niveles de COS, a profundidad de 20 a 40 cm, que se presentan se encuentran expresados en toneladas por hectárea. Este valor se obtuvo a partir de la determinación del peso del suelo de cada parcela con la ayuda de los datos de densidad aparente y densidad real. Con esto se determinó el peso de una hectárea de suelo (10,000 m²) correspondiente a la parcela, teniendo en cuenta que los cálculos se realizan a una profundidad de 20 cm (ó 0.2 m). Posteriormente, del número de toneladas resultante de materia orgánica del suelo, se obtienen el valor correspondiente al carbono orgánico total (Vela 2012, Carvajal et al 2009).

A continuación se muestran los valores de carbono orgánico total del suelo los cultivos de nopal y maíz a profundidades de 0 a 20 y de 20 a 40 centímetros.

La figura 6.20 muestra los valores del carbono orgánico en los suelos de las parcelas para la profundidad de 20 a 40 cm. La parcela de nopal número 1 obtuvo un valor de 83.8 ton/ha; el valor de la parcela 2 es de 72.9 ton/ha y la parcela 3 obtuvo un valor de 82.1 ton/ha. El valor de la parcela de maíz aumentó, registrando un valor de 76.5 ton/ha.

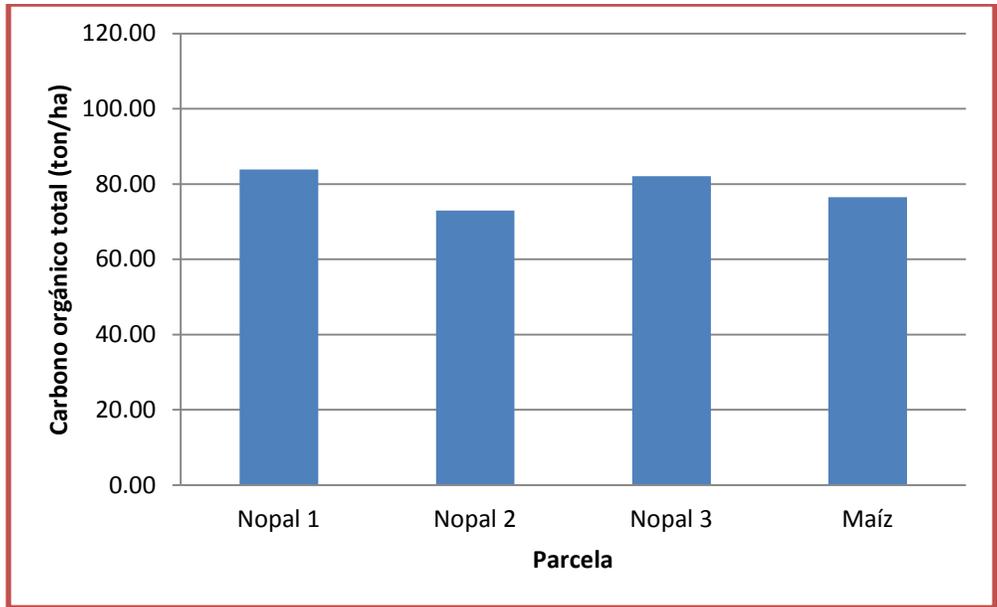


Figura 6.20. Valores de Carbono orgánico total en suelos de parcelas de nopal y maíz profundidad de 20 a 40 cm.

6.4.3 Carbono orgánico total entre cultivo de maíz y nopal de 0 a 20 cm de profundidad

Los valores de las parcelas de nopal (105.9 ton/ha) y de maíz (72.7 ton/ha) a profundidad de 0 a 20 centímetros señaladas en la figura 6.21, muestran diferencias significativas respecto a los niveles de COS. La prueba de t de Student (Tabla 7.10) indica que sí existe diferencia significativa, ($P \leq 0.0463$) con 0.05 de significancia, entre los valores de COS de estos dos cultivos, siendo el cultivo de nopal el que tiene mayores niveles de carbono orgánico total en suelos.

Tabla 6.10. Valores del estadístico t de COS entre cultivos

Valor		
	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Media	106.2278	72.7272

Varianza	232.3168	53.5295
Observaciones	3	2
Grados de libertad	3	
Estadístico t	3.2818	
P(T<=t) dos colas	0.0464	
Valor crítico de t (dos colas)	3.1824	

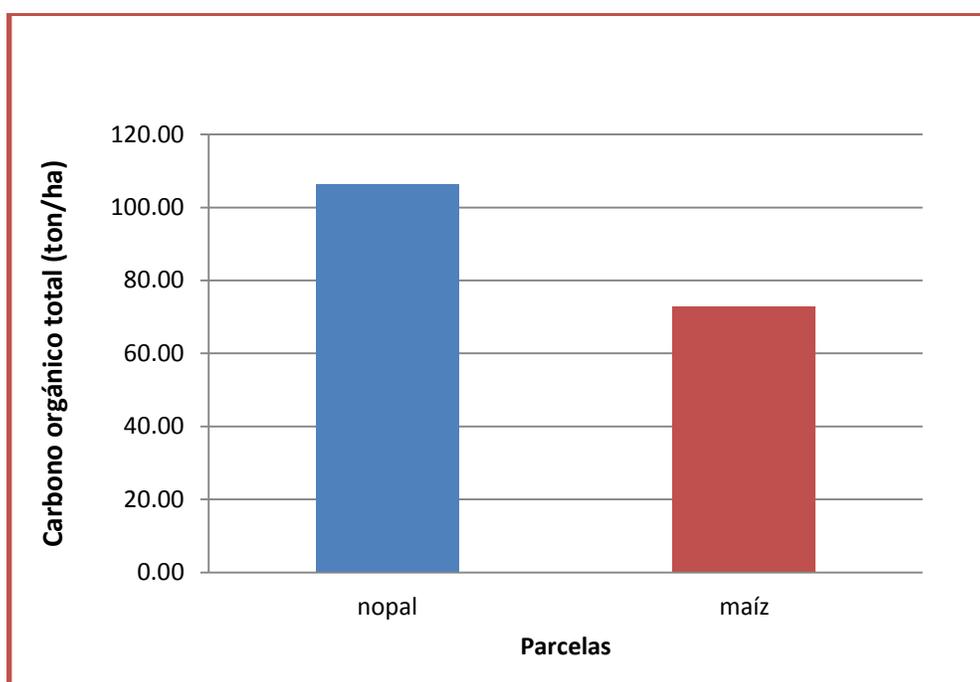


Figura 6.21. Valores promedio de carbono orgánico para el cultivo de nopal y maíz a profundidad de 0 a 20 cm

Los niveles de carbono orgánico en los suelos de las parcelas de nopal se mostraron mayores a los valores de los suelos en las parcelas de maíz a profundidad de 0 a 20 centímetros. Cada parcela de nopal reportó valores por encima de las 100 toneladas por hectárea, sumando un promedio de 105.9 ton/ha. Estos valores, mayores que los de la parcela de maíz (72.7 ton/ha), tienen relación con el manejo que recibe el cultivo

de nopal en la delegación Milpa Alta, el cual se acerca a la agricultura de conservación que FAO (2015) recomienda para el cuidado de suelos agrícolas. Por una parte existe poca perturbación física de los suelos de las nopaleras a causa de la labranza, ya que datos sobre el manejo que reciben las nopaleras de INEGI (2007), indican que estos suelos sólo se remueven cuando se realiza la plantación de una nopalera o se necesita integrar material orgánico acumulado en la superficie. Otro aspecto es puede explicar los niveles de COS en nopaleras es que el nopales un cultivo perenne, en base a FAO, el cultivo perenne brinda una mayor estabilidad al suelo. Por último, la principal causa de los niveles de carbono orgánico en los suelos de las nopaleras de Milpa Alta es la adición de una cobertura orgánica en forma de estiércol. Estos resultados coinciden con diversos autores (Liu *et al* 2003, Bayu 2008, Amiri y Fallahi 2009, Koga y Tsuji 2009, Salazar *et al* 2010, Fageria 2012, Rathod 2013) que han reportado un incremento de la materia orgánica en los suelos por la adición de estiércol animal.

Para el caso de las nopaleras de Milpa Alta la adición de estiércol representa parte vital de su manejo, la cantidad de adición varía en base a diferentes fuentes. El instituto nacional de ecología y cambio climático (2015) menciona que los suelos de las nopaleras de Milpa Alta reciben entre 50 y 100 toneladas de es estiércol bovino por hectárea, mientras que Lozada (2001) reportó que reciben aproximadamente 600 ton/ha. Los niveles de adición de estiércol se encuentran relacionados con la productividad de nopal, en base al SIAP (2015) en 2013 las nopaleras de milpa Alta tuvieron un rendimiento de 62 ton/ha, mayor que cultivos de nopal que no reciben abono orgánico, ya que estudios realizados por INIFAP (2008) indican que los cultivos de nopal abonados con 100 ton/ha de estiércol bovino, obtuvieron un rendimiento aproximadamente 25% superior a los cultivos que no habían sido abonados. Diversos autores coinciden en la relevancia de adición de estiércol en los volúmenes de producción agrícolas. Amiri y Fallahi (2009) adicionaron parcelas de manzana con 30 ton/ha de estiércol bovino, aumentando el volumen de producción en aproximadamente una tonelada. Koga y Tsuji (2009) experimentaron con la adición de estiércol combinado y reducción de labranza en cultivos de trigo y patata aumentaron los rendimientos en aproximadamente 1 y 4 ton/ha respectivamente.

Los niveles de COS en la parcela de maíz a profundidad de 0 a 20 cm, se encuentran por debajo de los niveles de las nopaleras, sin embargo, vistos como materia orgánica, son superiores a los reportados por (Rivera 2002, Salazar et al 2010, Vela 2012, Trejo et al 2013). Este comportamiento podría estar relacionado con los residuos del cultivo depositados sobre el suelo y tipo de suelo. En diferentes estudios (Liu *et al*, 2003, Koga 2009) se ha reportado que los residuos agrícolas depositados sobre el suelo, han favorecido el aumento en los niveles de Materia orgánica en suelo. Liu *et al* (2003), observó que los niveles de COS aumentaron con la adición de paja de trigo durante 9 años en suelos de cultivo de maíz-trigo, el aumento fue de 2.71% a 3.66% de materia orgánica, incluso el aumento fue mayor que con adición de estiércol.

Los niveles de COS en las parcelas de maíz también pueden estar influenciada por el tipo de suelos donde se encuentran, este corresponde al suelo phaeozem. Los suelos phaeozem son de origen volcánico y contienen alto contenido en materia orgánica, lo que los hace altamente productivos, potencial agrícola (UE, 2014)

6.4.4 Carbono orgánico total entre cultivo de maíz y nopal de 20 a 40 cm de profundidad

Los niveles de COS de los cultivos de nopal a profundidad de 20 a 40 cm se muestran en la figura 6.22. El valor promedio del COS del cultivo de nopal de 20 a 40 cm de profundidad es de 79.75 ton/ha, el cultivo de maíz es de 76.53 ton/ha. Los valores de COS para la parcela de nopal disminuyeron 24.7% con respecto a la primera profundidad, para el maíz se encontró un ligero aumento de 5% aproximadamente. El análisis estadístico de t de Student mostró que no existe una diferencia significativa, ($P \geq 0.78$) con 0.05 de significancia, a esta profundidad.

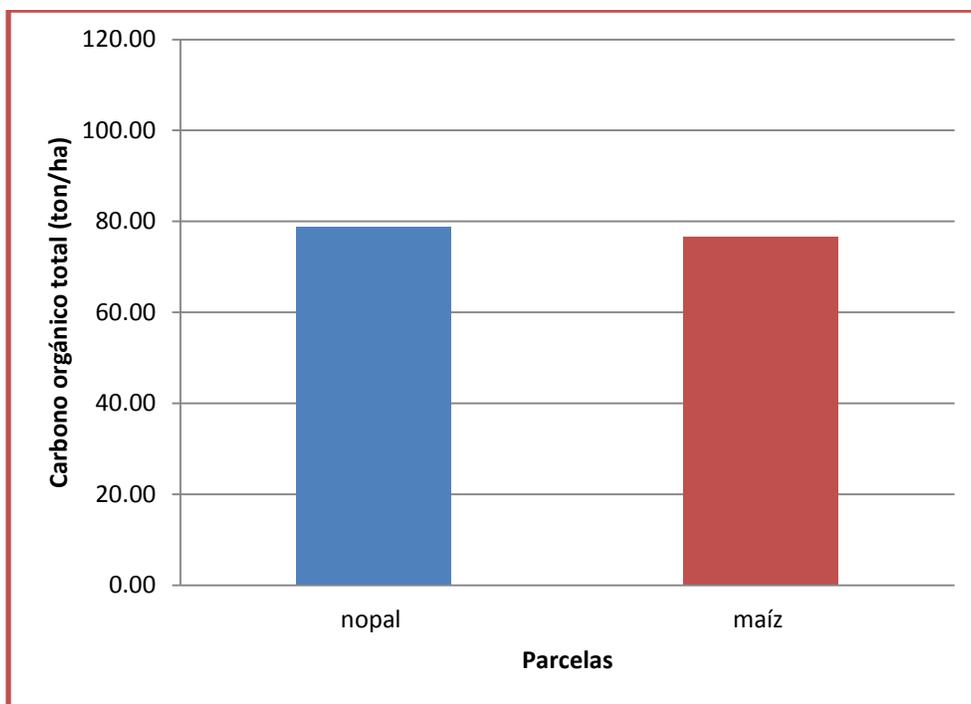


Figura 6.22. Valores promedio de carbono orgánico para el cultivo de nopal y maíz a profundidad de 20 a 40 cm

Las parcelas de nopal, sí reportaron una disminución de los niveles de COS a profundidad de 20 a 40 centímetros, respecto a la profundidad de 0 a 20 centímetros. Este comportamiento coincide con diversos trabajos (Liu *et al* 2003, Carvajal *et al* 2009) ya que los horizontes superiores del suelo contienen mayor cantidad de materia orgánica, por lo que la disminución de COS a mayor profundidad es normal. Los niveles de COS del cultivo de maíz a diferentes profundidades posiblemente se mantienen constantes por acción mecánica, ya que al momento de la toma de la muestra, y en base a información proporcionada por el productor, tenía un par de semanas que se había arado y volteado el suelo.

En base a la clasificación que realiza Echevers (1989) para los suelos de origen volcánico, el valor del porcentaje de materia orgánica que reportaron los suelos del cultivo de maíz a profundidad de 0 a 20 y 20 a 40 cm (5.78% y 5.70% respectivamente) de se encuentra con un valor bajo.

6.5. Servicios ambientales brindados por los cultivos intensivos de nopal de la delegación Milpa Alta.

Power (2010) señala que la agricultura presta servicios ambientales tales como la regulación de la calidad de suelo y agua, secuestro de carbono, mantener la biodiversidad y servicios culturales. PNUMA en su anuario 2012, indica que el carbono en suelo contribuye a regular el clima, las reservas de agua y a diversidad biológica y, por ello, en proporcionar los servicios ambientales que son esenciales para el bienestar humano. La producción de nopal parece ajustarse a los diferentes servicios ambientales, principalmente los suelos, que diversos autores mencionan que pueden proporcionar los cultivos.

Son varios los autores comentan que los sistemas agrícolas se sirven de los servicios ambientales y al mismo tiempo, y según el manejo de estos, proveen servicios ambientales (Dale y Polasky 2007, Ghaley 2014, Power 2010, Porter *et al* 2009). Algunos servicios ambientales del suelos que la agricultura puede ofrecer es la producción biomasa en forma de alimento y en algunos casos biocombustibles, captura de carbono, reciclo se nutrientes y purificación de aire de factores contaminantes (Zhang *et al*, 2007). A nivel granja o campo el ciclo de nutrientes y el secuestro de carbono son vitales para mantener la capacidad productiva del suelo, mientras que a escala regional o global estos dos servicios ambientales tienen la misma importancia para mantener el ciclo biogeoquímico así como mitigar las adversidades del efecto climático (Ghaley, 2014).

Algunas de las características que sugieren que los suelos de las parcelas de nopal evaluadas puedan brindar diversos servicios ambientales son las siguientes: cuentan con valores que indican características físicas y químicas saludables. Los niveles de materia orgánica, densidad aparente y humedad son mejores que los reportados por la parcela de maíz a las dos profundidades. El reciclo de nutrientes en las nopaleras de Milpa Alta se realiza principalmente con la adición de estiércol fresco de bovino sobre el suelo, este es aprovechado por el cultivo para el aumento de la producción de biomasa.

Parte de ese estiércol adicionado se queda capturado en el suelo en forma de materia orgánica y consecuentemente, carbono orgánico.

El carbono orgánico del suelo es uno de los principales indicadores de bienestar del suelo y por tanto de servicios ambientales, a continuación se muestran estos datos para el caso de las nopaleras de la delegación Milpa Alta.

6.5.1 Carbono orgánico en el cultivo de nopal

La captura de carbono orgánico en suelo de cultivos bajo características de manejo especiales ha sido reportada por diversos autores (FAO 2002, Velázquez *et al* 2008, Koga y Tsuji 2009, Núñez *et al* 2011). Dentro de los cultivos, las plantas perennes ofrecen una mayor estructura y estabilidad al suelo, por lo que la presencia de este tipo de cultivos promueve la poca perturbación en suelos (Cole, 1995). En consecuencia, los cultivos perennes repercuten positivamente en los niveles de carbono orgánico al permitir que este permanezca por mayor tiempo capturado en suelos (Cox 2002, Lemus y Lal 2007, Mehdi *et al* 2015).

Los valores de COS de las parcelas de nopal muestreadas a profundidad de 0 a 20 y de 20 a 40, en la delegación Milpa Alta, se muestran en la figura 6.23 y 6.24.

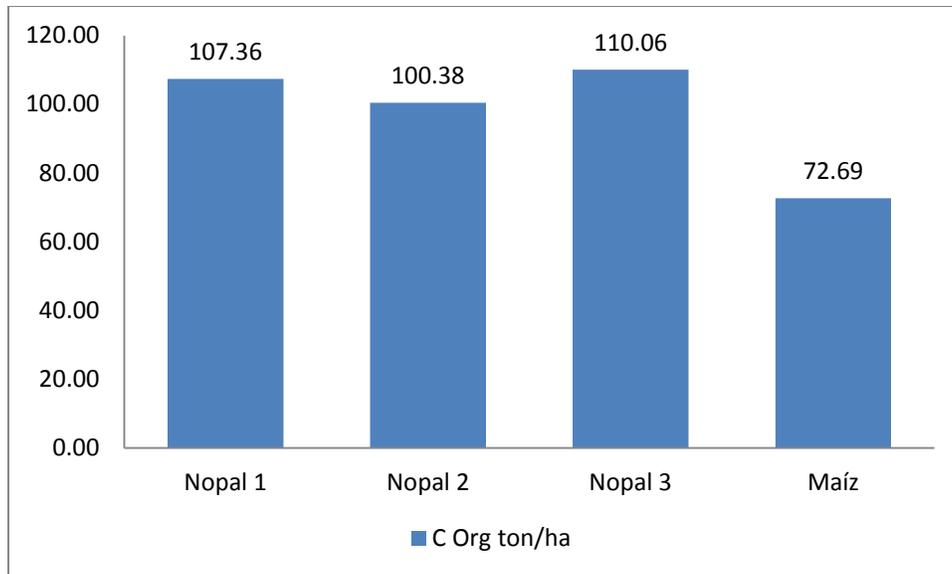


Figura 6.23. Niveles de COS en las parcelas a profundidad de 0 a 20 cm

La figura 6.23 Muestra mayores niveles de COS a profundidad de 0 a 20 cm en los cultivos de nopal, el promedio de los valores de COS de las parcelas de nopal es de 105.9 ton/ha contra en valor de la parcela de maíz la cual reportó 72.7 ton/ha. Los valores de COS de maíz representan el 69% de los valores del promedio de nopal, además, el análisis estadístico indico una diferencia significativa entre cultivos ($P \leq 0.0463$).

Por la diferencia encontrada entre los cultivos a profundidad de 0 a 20, se deduce que las parcelas de nopal sí tienen el potencial de capturar carbono orgánico total en sus suelos.

Los valores de COS para la profundidad de 20 a 40 cm (Tabla 6.24) muestran una disminución similar para las parcelas de nopal, la parcela de maíz tuvo un ligero aumento.

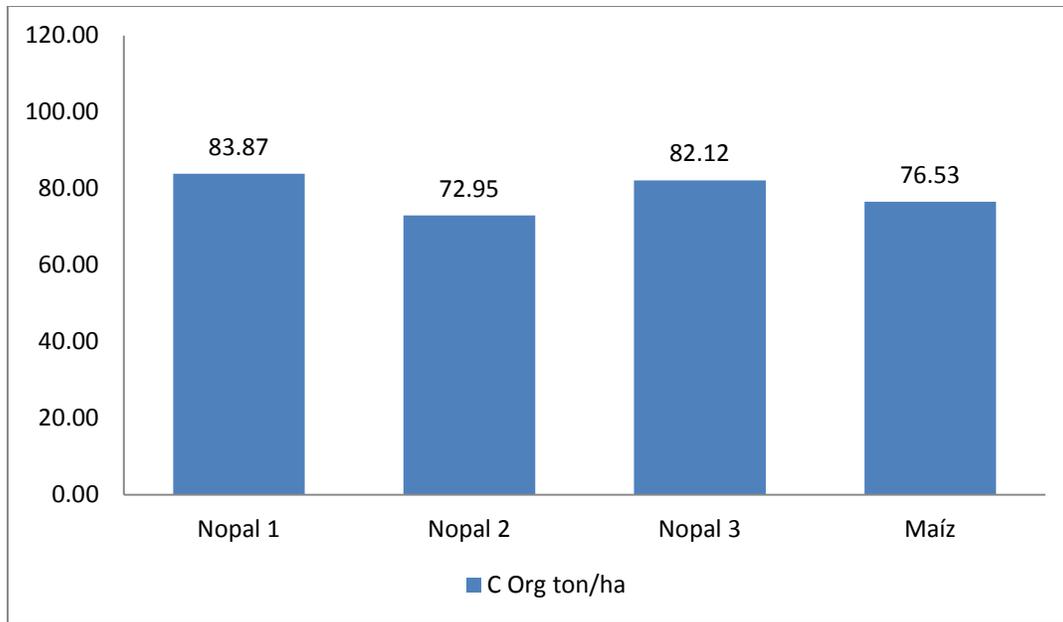


Figura 6.24. Niveles de COS en las parcelas a profundidad de 20 a 40 cm

A pesar de que existió una homogenización en los niveles de carbono orgánico entre cultivos, las condiciones en las que se encuentra cada cultivo hacen que se tenga que considerar de diferente manera los valores de COS.

El nopal, al ser una planta perenne, no cuenta con perturbación física en suelos a profundidad de 20 a 40 cm, dándole estabilidad al carbono orgánico total presente (Mehdi *et al*, 2015). Este COS cuenta con mayor tiempo de permanencia en el suelo, evitando así, que se encuentre en forma de CO₂ atmosférico (FAO, 2002). Un resultado similar encontró Liebig *et al* (2005), quienes compararon el COS de un pasto forrajero perenne (*Panicumvirgatum*) con diversas tierras de cultivo estacional hasta una profundidad de 120 cm, dividiendo la muestra en varias secciones de profundidad. En este estudio se encontró que el cultivo perenne almacenaba más carbono, inicialmente en profundidad de 0 a 5 cm, posteriormente se encontraron mayores niveles de COS a partir de los 30 cm de profundidad. Respecto al COS a profundidad mayor a 30 cm, el estudio concluye que el COS cuenta con mayor estabilidad, al ser menos susceptible a la mineralización y pérdida.

El COS presente en la parcela de maíz no se considera que tenga una estabilidad por la constante perturbación física que le proporciona la labranza. El suelo del cultivo de maíz, al ser removido en diferentes ocasiones durante cada ciclo, hace que los suelos de diferentes profundidades sean removidos de su ubicación inicial, pudiendo pasar de una zona baja en el horizonte, a profundidad de 30 cm por ejemplo, a la parte superficial del suelo o de manera inversa. Esta característica hace que el COS no sea estable y ya que una gran cantidad de COS tiene en riesgo de ser degradado por las acciones climáticas.

Los valores de cada parcela de nopal dependen de las características de manejo que recibe cada una, la Tabla 6.11 muestra las características fisiográficas y de manejo que las parcelas de nopal que se muestrearon reciben.

Tabla 6.11. Datos de ubicación y manejo de las parcelas de nopal y maíz estudiadas

Parcela	Coordenadas	Pendiente	Altura (m)	Densidad (m ²)	Abonado	Estiércol en suelo (cm)	Edad (años)
Nopal 1	19° 10' 37.4" N 99° 01' 34.4" O	-7	2619	4.5	Anual	10	4
Nopal 2	19° 10' 34.8" N 99° 0' 54.3" O	-5	2637	4.2	bianual	20	14
Nopal 3	19° 9' 49.3" N 99° 2' 40.3" O	-3	2835	5	bianual	20	17
Maíz	19° 10' 33.15" N 99° 1' 31.6" O	-3	2631	5.4	Químico	-	2

La diferencia de COS que se encuentran entre las parcelas de cultivo de nopal se debe a las características propias de la cada una de ellas. La edad del cultivo, la pendiente de la parcela, la altura y la cantidad de avino que se aplica en cada parcela de nopal, repercuten en los niveles de carbono orgánico en el suelos de cada parcela.

La pendiente reportada de podría no influir en los niveles de carbono orgánico ya que Hernández *et al* (2012), reportaron no encontrar diferencia significativa de COS en cultivos de maíz y Agave con una pendiente de 20%.

La edad del cultivo influye en los niveles de carbono orgánico, esto se debe al tiempo que hayan sido tratadas las parcelas con estiércol bovino, como lo demostró Liu *et al* (2003) quienes tras 9 años de añadir estiércol porcino a suelos en rotación de trigo y soya, reportaron un aumento de 3.2 ton/ha.

La altura es un factor que puede influir en el COS, sin embargo los niveles de COS encontrados entre las parcelas de nopal tienen poca variabilidad, la cual, para la profundidad 0 a 20 cm y una diferencia de 200 msnm aproximadamente, se encontró una diferencia aproximada de 10 ton/ha, entre la parcela con mayores niveles y la que contenía menores niveles de COS. Dichos resultados parecen indicar que la diferencia de altura que existe entre las parcelas de nopal, no influye de manera determinante en el COS, ya que Carbajal *et al* (2009) reportaron mayores diferencias en los valores de COS en base a la altura para diferentes cultivos, destacando el cultivo de café, variedad caturra, el cual reportó una diferencia de aproximadamente 43 ton/ha entre una altura de 1150 y 1600 msnm.

La densidad del número de plantas de nopal por parcela, podría repercutir en los niveles y la estabilidad de COS, principalmente por la acción de las raíces, ya que la exploración de raíces en el suelo genera las condiciones para mejorar la porosidad (Valera *et al* 2011, Carrizo *et al* 2015).

Tabla 6.12. Volumen de producción de las parcelas de nopal de la delegación Milpa Alta.

	Temporada baja			Temporada alta			Peso de cajas kg	Total ton
	Cajas semanal	Cajas 6 meses	Toneladas	Cajas semanales	Cajas 6 meses	Ton		
Nopal 1	35	910	13.65	78	2028	30.42	15	44.07
Nopal 2	40	1040	15.6	95	2470	37.05	15	52.65
Nopal 3	5	130	1.95	22	572	8.58	15	10.53

La tabla 6.12 indica los volúmenes de producción de las parcelas que fueron muestreadas para el estudio. La información fue proporcionada por el productor dueño de la parcela. La manera de cuantificar la producción es mediante la cantidad de cajas de nopal cosechadas por cada cosecha, así se determinó la cantidad de cajas que cada productor producía de manera semanal y según la temporada del año. Se obtuvieron las toneladas por año en el supuesto de que cada caja tenía un peso aproximado de 15 kg.

Los rendimientos de las parcelas de nopal, a pesar que se encuentran por debajo de las 62 toneladas por hectárea que el SIAP reportó para 2013, se encuentran muy por encima de las 1.9 ton/ha que reportó el maíz. Las parcelas de nopal reportaron producciones de 44.1, 52.6 y 10.5 ton/ha respectivamente. Esto hace evidente las enormes cantidades de biomasa que los cultivos de nopal son capaces de producir.

Dadas las características que se mostraron para cada una de las parcelas de nopal, parece ser que el factor que más influye en los resultados de COS es la edad del cultivo, y los niveles de producción, ya que la parcela que reportó mayor producción, fue la que menor COS obtuvo, así como la que menor producía es la que mayor niveles de COS reportó.

Lal (2004), concluye que el secuestro de carbono en suelos es una estrategia para la seguridad alimentaria a través del mejoramiento de la calidad del suelo. Es una consecuencia de la inevitable necesidad de adoptar prácticas de mejoramiento de suelos para mejorar los rendimientos productivos agrícolas a nivel mundial. Es por eso que los beneficios ambientales que el cultivo de nopal puede ofrecer se centran principalmente en la captura de carbono y la consecuente producción de alimentos.

6.5.2 Servicios ambientales en los cultivos de nopal

La ficha técnica llamada “secuestro de carbono en suelos en la agricultura de conservación; un marco para la valoración de carbono en suelos como un sistema ambiental crítico” Proporcionada por FAO (2015), indica los principales beneficios que

los campesinos y el medio ambiente pueden obtener a través del secuestro de carbono en suelos. Respecto a los beneficios ambientales proporcionados por los suelos agrícolas destacan:

- Producción de alimentos

- Mejora de la calidad de aire

- Mayor retención de agua en suelos evitando problemas de inundaciones

- Reducción de la desertificación

- Aumento de la diversidad del suelo

- Potencial de reducción de otros gases de efecto invernadero si se evita la compactación del suelo

- Fuente de agua y alimentos más seguros

Las características anteriores se encuentran altamente influidas por las características físicoquímicas y el tipo de manejo del suelo. Ante los buenos valores encontrados en los suelos, se puede deducir que las nopaleras de la delegación Milpa Alta sí pueden prestar los servicios ambientales antes mencionados.

Se considera que los altos niveles de carbono orgánico que se encontraron en los suelos de las nopaleras de delegación Milpa Alta tienen relación con las tasas de rendimiento de cultivo de nopal, las cuales son altas, para el caso del estudio realizado obtuvieron de 10.5 a 52.6, y llegando a alcanzar hasta 64 ton/ha al año en base a información del SIAP (2015).

Esta alta tasa productiva, en base a información del INECC (2015) y por los mismos productores, están supeditadas por la adición de material orgánico al suelos del cultivo. Por este motivo, los campesinos obtienen ganancias económicas generalmente altas (Rivera, 2002).

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

La fertilización con estiércol fresco de bovino y las características propias de la planta (*Opuntia ficus-indica* L.), hacen que el reciclaje de nutrientes se realice de manera intensiva para mantener la producción de nopal verdura. Para sostener los niveles de productividad en las nopaleras se estima, como fertilizante, un promedio de 600 ton/ha de estiércol fresco mismas que pueden ser incorporadas en cualquier época del año. La producción anual promedio de nopal es entre 50 y 60 toneladas, dividida en dos temporadas. El presente trabajo mostró que el intensivo reciclaje de nutrientes está altamente relacionado con la producción de biomasa en forma de nopal. Para poder mantener esos niveles de intensidad productiva es necesario mantener en buen estado físico-químico las propiedades del suelo, lo cual se logra con la presencia de materia orgánica. La materia orgánica presente en los suelos de las nopaleras tiene su origen principalmente por la adición de estiércol fresco y es un indicador de la cantidad de carbono presente en el suelo. El carbono, al estar capturado en suelo, evita estar en la atmósfera en forma de CO_2 y contribuir a la contaminación del aire y al calentamiento global.

El mantenimiento de la estructura del suelo y coincide con los objetivos de la agricultura de conservación, ya que se obtienen mayores rendimientos productivos, mejorar las características físico-químicas del suelo y es capaz de capturar y secuestrar carbono en suelos.

Los resultados físicos y químicos de las parcelas de nopal, obtuvieron mejores valores que la parcela de maíz, este comportamiento se le atribuye a los altos niveles de materia orgánica presentes en los suelos de nopal, resultados del manejo que reciben.

Al demostrarse que los niveles de carbono orgánico total en suelos de nopaleras es mayor que el reportado por el cultivo de maíz a profundidad de 0 a 20 cm, y que el COS es más estable en suelos con cultivos de nopal que de maíz, destacando la mayor profundidad de 20 a 40 cm, el cultivo de nopal sí tiene la capacidad de ser considerado como secuestrador de carbono en suelos.

Los mayores niveles de COS del cultivo de nopal en comparación con el cultivo de maíz sí prestan servicios ambientales, los más evidentes son la alta producción de biomasa de nopal que sirve como alimentos, una mejor fertilidad del suelo, limpieza del aire y el reciclaje de nutrientes.

Es claro que uno de los beneficios ambientales del cultivo de nopal es la capacidad de reciclar altas cantidades de estiércol fresco en ámbitos urbanos, que en otras condiciones serían considerados contaminantes. Además de retener carbono y mantener la estructura del suelo evita que la mancha urbana avance hacia suelos agrícolas como pasa en el valle de México. Aspectos culturales en el consumo de nopal hacen que el cultivo tenga una constante demanda durante todo el año. En términos socio-ambientales es clara la adaptación del cultivo a los niveles de intensidad productiva además de la integración social, económica, de mercado y tecnológica.

7.1 Perspectivas

-Estudios posteriores deberán evaluar el efecto, y la posible remediación, que la adición de estiércol bovino tiene en el medio ambiente por causa de la lixiviación de compuestos nitrogenados que puedan contaminar el suelo, pudiéndose infiltrar a los mantos acuíferos. En el mismo sentido, el estiércol fresco produce cierto grado de emisión de diferentes GEI como el metano y el dióxido de carbono.

-A pesar de la falta de información de los niveles óptimos de aplicación de estiércol en los suelos del cultivo de nopal, manejo integral que reciben estas parcelas han resultado benéficos para al medio ambiente, por lo que se podría implementar dicho modelo para otros cultivos.

-Las políticas a futuro en México deberán contemplar a los cultivos agrícolas como prestadores de servicios ambientales, específicamente en el secuestro y captura de carbono, así los campesinos que apliquen medidas para mejorar el manejo de sus tierras, puedan tener acceso a estímulos como los bonos de carbono.

Bibliografía

- Alvarado *et al*, 2013. Almacenamiento de carbono orgánico en suelos en sistemas de producción de café (*Coffea arabica* L.) en el municipio de Líbano, Tolima Colombia. Colombia Forestal. Vol. 16 (1), 21-31
- Amiri Mohammad & Fallahi Esmail, 2009. Impact of Animal Manure on Soil Chemistry, Mineral Nutrients, Yield, and Fruit Quality in 'Golden Delicious' Apple. Journal of Plant Nutrition. 32:4, 610-617
- Banco mundial, 2009. México: estudio sobre la disminución de emisiones de carbono. <http://www.bancomundial.org/> consultado el 12 de febrero de 2014. P 1-3.
- Banco Mundial, 2015. Consultado el 25 de marzo del 2015 <http://datos.bancomundial.org/indicador/AG.LND.AGRI.ZS/countries/1W?display=graph>)
- Bayu, 2008. The role of animal manure in sustainable soil fertility management in sub-Saharan Africa: A review. Journal of Sustainable Agriculture. 25:2, 113-136.
- Carbajal, 2009. Carbono orgánico del suelo en diferentes usos del terreno de paisajes andinos colombianos. Scienc. Suelo Nutr. Vol 9. Pp 222-235
- Carrizo *et al*, 2011. Atributos químicos de suelos Argiudoles cultivados y no cultivados del departamento las colonias (Santa Fe). Revista Argentina Suelos V 29. Pp 173-179.
- Carrizo *et al*, 2015. Aggregation agents and structural stability in soils with different texture and organic carbon contents. Scientia Agricola. Vol 72. Pp 75-82.
- CEH (Centre for ecology and hydrology), 2014. http://www.ceh.ac.uk/sci_programmes/soil-capital-ecosystem-services.html consultado 31 octubre 2014
- Comerford y Nicholas, 2013. Assessment and Evaluation of Soil Ecosystem Services. Soil Science Society of America. doi:10.2136/sh12-10-0028.
- CONABIO (Comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad), 2011. Informe final, "Estado del conocimiento de las especies del nopal (*Opuntia* spp.) productoras de xoconostles silvestres y cultivadas" http://www.biodiversidad.gob.mx/genes/centrosOrigen/Opuntia/Informe_Final/Informe%20final%20Opuntia.pdf
- CMCC (Conversión marco del cambio climático), 2014. https://unfccc.int/portal_espanol/informacion_basica/items/6168.php consultado el 10 de enero de 2014.

- Cole, 1995. Clima chance 1995: the IPCC second assessment report. Intergovernmental panel on clima chance.
- CORENA, 2015. <http://www.sma.df.gob.mx/corena/>
- CNZA (Comisión Nacional de las Zonas Áridas), 1994. Nopal Verdura, Opuntia spp. Cultivo Alternativo para las zonas Áridas y Semiáridas de México. Pp 5-6 México.
- Cox TS, M Bender, C Picone, DL Van Tassel, JB Holland, EC Brummer, BE Zoeller, AH Paterson & W Jackson(2002) Breeding Perennial Grain Crops. CriticalReviews in PlantSciences
- Dale, 2007. Measures of the effects of agricultural practices on ecosystem services. Ecologicaeconomics. N. 64 pp 286-296.
- Díaz, 2012. El Cambio Climático. Ciencia y Sociedad, vol. XXXVII, núm. 2, pp. 227-240 Instituto Tecnológico de Santo Domingo Santo Domingo, República Dominicana.
- Duarte, 2006. Cambio global, impacto de la actividad humana sobre el sistema tierra. Consejo superior de investigaciones científicas. P 23-75
- ENCC, 2014(Estrategia nacional de cambio climático) México, 2013. <http://www.encc.gob.mx/> consultado el 4 de marzo del 2014.
- Erickson J. 1994. El efecto invernadero, el desastre del mañana, hoy. Serie Mcgraw-hill de divulgación científica. P 1-2
- Etchevers, 1989. Interpretación de los análisis químicos del suelo. Cenrto de edafología, colegio de posgraduados.
- Fageria, 2012. Role of Soil Organic Matter in Maintaining Sustainability of Cropping Systems.Communications in Soil Science and Plant Analysis.Vol 43.Pp 2063-2113.
- FAO, 2002. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra
- FAO^A, 2002. Agricultura de conservación. Estudio de caso para América Latina y África
- FAO, 2004. Carbon sequestration in dry land soils.
- FAO, 2005. The importance of soil organic matter, key to drought-resistant soil and sustained production.Pp 5-13
- FAO, 2006. Utilización agroindustrial del nopal. ISBN 92-5-305518-9
- FAO, 2008. Soil carbon sequestration in conservation agriculture, a framework for valuing soil carbon as a critical

ecosystemservice.http://www.fao.org/ag/ca/doc/ca_ssc_overview.pdf consultado el 30 de marzo de 2015.

-FAO, 2009. La FAO en México, más de 60 años de cooperación 1945 – 2009. ISBN 978-92-5-306418-2

-FAO, 2012. Soil organic carbon accumulation and greenhouse gas emission reductions from conservation agriculture. http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/agp/icm16.pdf

-FAO, 2014. Ciudades más Verdes en América Latina y el Caribe. E-ISBN 978-92-5-308251-3

-FAO^A, 2014. Consultado el 4 de noviembre de 2014. <http://www.fao.org/ag/againfo/programmes/es/lead/toolbox/Tech/20ManMgn.htm>

-FAO, 2015. Consultado el 2 de abril <http://www.fao.org/ag/ca/es/index.html>

-FAO^A, 2015. Consultado el 24 de marzo. <http://www.fao.org/soils-2015/faq/en/>

-FAO^B, 2015. Consultado el 19 de marzo. <http://www.fao.org/docrep/t2351s/t2351s06.htm>

-FAO 2014, El suelo, <http://www.fao.org/docrep/006/w1309s/w1309s04.htm> consultado el 24 septiembre de 2014|

-FPP (Fundación produce Puebla) 2015, consultado el 2 de abril <http://www.fuppue.org.mx/cambio-climatico/agricultura-de-conservacion>

-Farfán, 2008. Milpa Alta; Aproximación bibliográfica. Revista Boletín, UNAM. <http://www.revistas.unam.mx/index.php/biib/article/view/24284> consultado el 7 de febrero del 2014.

-GDF, 2012. Atlas geográfico del suelo de conservación del Distrito Federal. Secretaría del Medio Ambiente, Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del Distrito Federal. <http://www.paot.org.mx/index.php/mapoteca>

-Ghaley, 2014. Soil-based ecosystem services: a synthesis of nutrient cycling and carbon sequestration. International journal of biodiversity science, ecosystem services and management. Vol. 10. Pp 177-186.

-Granados y Castañeda, 1991. El nopal. Historia, fisiología, genética e importancia frutícola. Trillas. P 13-22

-Griffith, 2004. The origins of an important cactus crop, opuntia ficus-indica (cactaceae): new molecular evidence. American Journal of Botany. Vol. 91 pp 1915-1921.

- Hernández *et al* (2012). Influencia del relieve en las propiedades físicas y químicas de suelos agrícolas adyacentes al río Lerma. *Biológicas* Vol. 14. Pp 23
- Hontoria *et al* (2004). Contenido de carbono orgánico en el suelo y factores de control en la España peninsular. *Edafología* Vol. 11. Pp 149-157.
- Iglesias, 1995. El estiércol y las prácticas agrarias respetuosas con el medio ambiente. Hojas de divulgación, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España.
- INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático), 2014. ¿Qué se está haciendo para mitigar el cambio climático? Ámbito global. <http://www.inecc.gob.mx/> consultado el 17 de febrero de 2014.
- INECC , 2015. ¿Qué se está haciendo para mitigar el cambio climático? Ámbito global. <http://www.inecc.gob.mx/> consultado el 12 de enero de 2015.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), 2007. Características principales del cultivo de nopal en el Distrito Federal Caso Milpa Alta http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/censos/agropecuaria/2007/agricola/nopal_df/CulnopDF.pdf
- INEGI, 2014. <http://www.inegi.org.mx/> consultado el 28 de enero del 2014.
- INIFAP, 2000. El cultivo de nopal verdura en Milpa Alta, D.F. <http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/xmlui/handle/123456789/1743> Consultado el 24 de noviembre de 2014.
- INIFAP (Instituto nacional de investigación forestal, agrícola y pecuaria), 2011. Producción Invernal de Nopal de Verdura. ISBN 978-607-425-706-9
- IPCC (Panel intergubernamental sobre cambio climático), 2001. Tercer informe de evaluación. <http://www.ipcc.ch/pdf/climate-changes-2001/impact-adaptation-vulnerability/impact-spm-ts-sp.pdf> consultado el 10 de febrero de 2014.
- Jaramillo, 2004. Cambio climático: una visión desde México. El ciclo global del carbono. SEMARNAT, INE. P 77-85.
- Jaurixje *et al*, 2013. Propiedades físicas y químicas del suelo y su relación con la actividad biológica bajo diferentes manejos en la zona de Quibor, Estado de Lara. *Bioagro* 25(1): 47-56.
- Jenkins, 1988. The turnover of organic matter in soil. In: Wild, A. (Ed.), *Russell's Soil Conditions and Plant Growth*. Long man Scientific and Technical, Harlow, pp. 564–607.

-Jenkinson, 1990. The turnover of organic carbon and nitrogen in soil. *Phil. Trans. R. Soc. B* 329, 361–368. doi:10.1098/rstb.1990.0177.

-Jiménez *et al*, 2004. Efectos del estiércol bovino sobre algunas propiedades químicas de un Ultisol degradado en el área de la Machiques Colón, Estado de Zulia. *Facultad de Agronomía Caracas*. 21(4).

-Jiménez, 2011. Las cactáceas mexicanas y Los riesgos que enfrentan. *Revista digital universitaria*. Vol. 12 N. 1. ISSN: 1067-6079

-Kiesling, 2013. Historia de la *Opuntia Ficus-Indica*. *Actas de la Segunda Reunión para el Aprovechamiento Integral de la Tuna y otras Cactáceas y I Reunión Sudamericana CACTUSNET FAO-ICARDA*.

-Kirschbaum, 2000. Will changes in soil organic act a positive or negative feedback on global warming. *Biogeochemistry*. 48, pp 21-51.

Koga y Tsuji 2009. Effects of reduce tillage, crop residue management and manure application practices on crops yields and soil carbon sequestration on an Andisol in Northern Japan. *Soil science and plant nutrition*. 55(4), 546-557.

-Kuan, 2004. Carbon sequestration and stabilization in soil: implications for soil productivity and climate change. *Soil science and plant nutrition*. Vol 50. Pp 467-476. Doi: 10.1080/00380768.2004.10408502.

-Lal, 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*. 304, 1632-1627

-Lal, 2007. Carbon sequestration. *Phil. Trans. R. Soc. B* (2008) 363, 815–830 doi:10.1098/rstb.2007.2185.

-Lal, 2009. The plow and the agricultural sustainability. *Journal of sustainable agriculture*. Vol. 33 pp 66-84.

-Lemus R. & R. Lal (2005) Bioenergy Crops and Carbon Sequestration. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 24:1, 1-21

-Liebig *et al*, 2005. Soil carbon under switchgrass stands and cultivate cropland. *Biomass and energy*. Vol. 28. Pp 347-354.

-Liu *et al*, 2003. Soil organic carbon dynamics in black soils of China under different agricultural management system. *Communications in soil science and plant analysis*. Vol 34, pp 973-984 doi: 10.1081/CSS-120019103.

- Lizcano *et al*, 2006. Suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia. Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol 6. Pp 167- 198
- Losada, 2001. Assessing the sustainability of a terraced agroecosystem for production of nopal vegetable (*Opuntia ficusindica*) in the metropolitan Mexico city. American Journal of Alternative Agriculture.
- Loveland, 2003. Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions: a review. Soil & Tillage Research 70 (2003) 1–18.
- Martínez *et al*, 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal. 8(1), 68-96.
- Mehdi *et al*, 2015. Soil organic carbon sequestration under two dedicated perennial bioenergy crop. Resource efficient agricultural production.
- Moreno, 1989. Interpretación de los análisis químicos del suelo. Centro de edafología, colegio de posgraduados.
- Núñez *et al*, 2011. Efecto de la materia orgánica sobre las propiedades físicas del suelo en un sistema agroforestal de la llanura costera norte de Nayarit, México.
- ONU. 1998. Protocolo De Kioto. Convención Marco De Las Naciones Unidas Sobre El Cambio Climático. Convención marco del cambio climático.
https://unfccc.int/portal_espanol/informacion_basica/protocolo_de_kyoto/items/6215.php
consultado el 22 de enero de 2014.
- Ordoñez, 2008. Como entender el manejo forestal, la captura de carbono y el pago de servicios ambientales. Ciencias N. 90 UNAM P 37-42.
- PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente), 2003. Manual de Ecología Básica y de Educación Ambiental, Mesa México-Suiza. Crisis ambiental. Pp 4-14.
- PNUMA, 2012. Temas emergentes en nuestro medioambiente mundial.
- Ponce, 2011. Programa integral para el aprovechamiento sustentable del cultivo del nopal en el Distrito Federal (Milpa Alta y Tláhuac). Memorias IX simposium-taller nacional y II internacional sobre producción y aprovechamiento del nopal y maguey. ISSN 1870-0160
- Porter *et al*, 2009. The value of producing food, energy, and ecosystem services within an agroecosystem. Royal Swedish Academy of Sciences. Vol. 38. Pp 185-193.

- Power, 2010. Ecosystem services and agriculture: tradeoffs and synergies. Philosophical Transaction of The Royal Society. Vol. 365. Pp 2959-2971.
- Ramírez, 2009. Efectos de agroquímicos en las propiedades físico-químicas y biológicas en suelo del Táchira-Venezuela. Tesis. Universidad Industrial de Santander.
- Rathod *et al* (2013). Integrated use of organic and inorganic inputs in wheat-fodder maize cropping sequence to improve crop yields and soil properties. Archives of Agronomy and Soil Science. Vol. 59. Pp 1439-1455
- Reyes, 2005. Notas Sistemáticas y Una Descripción Detallada de *Opuntia Ficus-Indica* (L.) Mill. (cactaceae). Revista Agrociencias. Vol. 39 Pp 395-408.
- Reyes, 2014. Una ojeada a la clasificación de suelos. Revisa contactos, UAM. Pp 30-40
- Rioja, 2002. Apuntes de Fitotecnia General, E.U.I.T.A., Ciudad Real.
- Rivera, 2002. The sustainable potential of two contrasting agricultural systems in the terrase areas of Mexico City. Thesis (PhD.) University of London.
- Rosenzweig, 2000. Soil and global climate change: challenges and opportunities. Soilscience. Vol. 165. Pp 47-56
- Salazar *et al*, 2010. Efecto residual de estiércol bovino sobre el rendimiento de maíz forrajero y propiedades del suelo. Terra Latinoamericana. 28(4), 381-390.
- Salazar y Masera, 2010. México ante el Cambio Climático; Resolviendo Necesidades Locales con Impactos Globales. UNAM.
<http://www.oikos.unam.mx/Bioenergia/images/PDF/CC/CC-General/DossierUCCS-CC10A.pdf> Consultado el 12 de marzo.
- Santos, 2007. El nopal: su relación con los mexicas, su importancia ecológica y su uso medicina tradicion. Kuxulkab, revista de divulgación. Vol. 13. Pp 69-72.
- Saura, 2003. El cumplimiento del protocolo de Kioto sobre cambio climático. Universitat de Barcelona. P 9-10
- Schrag, 2007. Preparing to capture carbon. Science 315, 812–813.
doi:10.1126/science.1137632
- SCRIPPS CO₂ PROGRAM, 2015.
http://scrippsco2.ucsd.edu/research/atmospheric_co2.html Consultado el 30 de abril de 2015.

- SEDESOL, 2011. Atlas de riesgos naturales de la delegación Milpa Alta
<http://www.normateca.sedesol.gob.mx/> consultado el 2 de abril de 2014.
- SEDUVI (secretaría de desarrollo urbano y vivienda), 2011. Programa delegacional de desarrollo urbano de Milpa Alta.
<http://www.seduvi.df.gob.mx/portal/index.php/programas-de-desarrollo/programas-delegacionales>.
- SEMARNAT, 2002. Norma oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis.
- SEMARNAT 2007. ¿Y el medio ambiente? Problemas en México y el mundo.
<http://web2.semarnat.gob.mx/informacionambiental/Pages/yelmedioambiente.aspx> consultado el 4 de septiembre de 2014.
- SEMARNAT, 2012. Adaptación Al Cambio Climático En México: Visión, Elementos Y Criterios Para La Toma De Decisiones. 2012. <http://www.semarnat.gob.mx/> consultado en 11 de marzo de 2014.
- SENER (Secretaria de Energía), 2009. Políticas y medidas para facilitar el flujo de recursos derivados de los mecanismos internacionales de financiamiento.
<http://www.sener.gob.mx/> consultado el 30 de enero de 2014.
- SIAP (Servicio de información agroalimentaria y pesquera), 2015. Sistema de información agropecuaria y de pesca <http://www.siap.gob.mx/>
- Stockmann et al, 2012. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. Agriculture, ecosystems and environment. 164, pp 80-99.
- Trejo *et al*, 2013 Impacto del estiércol bovino en el suelo y producción de forraje de maíz. Revista Mexicana de ciencias agrícolas. 4(5), 727-738.
- UE (Unión Europea), 2014. Atlas de suelos de América Latina y el Caribe. PP 31-34
- UNAM, 2015. Manual de procedimientos analíticos. Laboratorio de física de suelos.
- USDA (United States department of agriculture), 2014. Keys to soil taxonomy, twelfth edition
- Varela *et al*, 2011. Cultivos de cobertura: efectos sobre la macroporosidad y la estabilidad estructural de un suelos franco-limoso.

-Vela *et al*, 2012. Niveles de carbono orgánico total en el suelo de conservación de Distrito Federal, centro de México. Investigaciones geográficas. 77, 18-38.

-Velázquez *et al*, 2008. Materia orgánica en tepetate bajo cultivo de higuera y pasto, acondicionado con estiércol y fertilizante. Agrociencia. Vol 42. Pp 11-19.

-Watson, 2003. Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-being. Pp 49-53. ISBN 1-55963-402-2.

-Zetina *et al*, 2005. Relación bases intercambiables-rendimiento de maíz en u cambisol dístico con labranza, encalado y abono verde. Terra latinoamericana vol. 23. Pp 389-397.

-Zhang, 2007. Ecosystem services and dis-services to agriculture. Ecological Economics. N. 64 pp 253-260.

Anexos

A continuación se describen los procedimientos para la realización de los análisis de laboratorio.

-Determinación de humedad

Se pesó un frasco de vidrio, apuntando su peso, para luego tarar la báscula e iniciar con el pesaje de la muestra. Se pesó una cantidad de 10 gr de suelo. Una vez la muestra colocada en el frasco, se introdujo el total de las muestras a una estufa donde permanecieron durante 48 horas a una temperatura de 60C y una ventilación constante para su secado.

Pasadas las 48 horas las muestras fueron nuevamente pesadas y se determinó, a través la diferencia del peso del frasco, la variación del peso de la muestra de suelo una vez seca. Obtenida la variación del peso se determinó la humedad a través de la siguiente fórmula:

$$\%H = \frac{PH - PS}{PS} (100)$$

Donde PH es el peso húmedo y el PS es el peso seco de las muestras, una vez realizado se obtuvieron los resultados.

-Determinación de densidad aparente

Para la determinación de densidad aparente se utilizó el método de la probeta, donde se utilizó una fracción del suelo seco, una probeta de 10 ml y una balanza analítica. La técnica consistió en llenar la probeta con suelo hasta el tope exacto de 10 ml, una vez lleno se tapó con el dedo índice el extremo abierto de la probeta y a continuación se procedió a dar 10 golpes de la base de la probeta sobre la mesa, previamente preparada con una toalla para evitar la ruptura de la probeta. Al final de los 10 golpes la

cantidad de suelo en la probeta se compactó en diferentes grados según cada muestra, posteriormente se volvió a llenar la probeta con el mismo tipo de suelo hasta el límite de 10 ml. Llevado a cabo este paso la probeta con la muestra se vuelve a pesar y se registra el dato, cabe destacar que la probeta vacía se pesó previamente.

Una vez hecho esto se determinó la densidad aparente utilizando la siguiente fórmula:

$$Da = \frac{PP - PPS}{VP}$$

Donde PP es el peso de la probeta; PPS es el peso de la probeta más el suelo al final del experimento y VP es el volumen de la probeta. Una vez realizado se obtuvieron los resultados.

-Determinación de Materia orgánica

Cabe destacar que ante la peligrosidad de algunos de los reactivos, el trabajo de laboratorio se realizó con el equipo adecuado y bajo el protocolo de seguridad pertinente para el manejo de estas sustancias.

Para la realización de esta técnica se llevaron a cabo los siguientes pasos, realizando el análisis de cada muestra por duplicado, además de un blanco previo:

- 1.- Primeramente se pesó una muestra de suelo de 0.5 g en un matraz Erlenmeyer de 500ml.
- 2.- se adicionaron 5 ml de dicromato de potasio, girando el matraz para que entre en contacto con la muestra.
- 3.- con extremo cuidado y con el uso de una bureta se agregó 10 ml de ácido sulfúrico concentrado, se giró el matraz durante un minuto. Este es el momento en que ocurre la reacción de carbón orgánico con los reactivos.
- 4.- las muestras ya reaccionadas se dejaron reposar por 30 minutos
- 5.- una vez pasado el tiempo se agregaron 100 ml de agua destilada.

6.- se añadieron 5 ml de ácido fosfórico concentrado.

7.- se añadieron 5 gotas del indicador (difenilamina).

8.- por último se titula con sulfato ferroso gota a gota hasta que la sustancia vire a un color verde turquesa. Posteriormente se apunta el valor de sulfato ferroso gastado para la reacción.

Una vez realizados estos pasos se determinan los niveles de materia orgánica de la muestra mediante la siguiente fórmula:

$$\%MO = \frac{B - T}{g} (N) (0.69)$$

Donde B es el sulfato ferroso valorado para el blanco; T es el sulfato ferroso gastado para valorar la muestra; la N es la normalidad exacta del sulfato ferroso (valorada por separado al momento de analizar las muestras); g es el peso de la muestra empleada.

Una vez obtenida la materia orgánica se deduce al carbono orgánico, suponiendo que el 58% de la materia orgánica corresponde al carbón orgánico.

Con lo anterior se obtuvieron los resultados de carbono orgánico del total de las parcelas muestreadas.

-Determinación de pH

Para la obtención del pH se utilizaron frascos de vidrio, un medidor de pH, balanza milimétrica y un agitador de bandeja. Primero para cada muestra se pesó y registró el peso del frasco de vidrio, posteriormente se agregó 10 gr de muestra de suelo y 20 ml de agua en el frasco. Se colocaron en el agitador de bandeja durante 30 minutos a una velocidad de 100 rpm para posteriormente dejarlo reposar durante 15 minutos. Posteriormente se midió el pH de las muestras con el medidor de pH previamente calibrado a pH 4, 7 y 10 con ayuda de la solución buffer, para esto el electrodo del medidor se introduce en el sobrenadado de cada muestra hasta que el valor este en un

número constante. Una vez tomada una medida el electrodo se enjuaga con agua destilada y se introduce al buffer de pH 7 hasta que lo marque el aparato, hecho esto ya está listo para tomar otra medición. El medidor de pH arroja el valor directo, sin necesidad de utilizar alguna fórmula.

-Determinación de Ca^{2+} y Mg^{2+} intercambiables

Para el procedimiento, se pesó un gramo de suelo y se colocó en un tubo de centrifuga, posteriormente se le agrego a cada tubo 5 ml de acetato de amonio 1N; pH 7 y se mezcló con un agitador de vidrio durante tres minutos. Se agregó 5 ml de acetato de amonio más al tubo, cuidando que se limpiara el agitador. Posteriormente las muestras se colocaron en una centrifuga durante cinco minutos a 3000 rpm, hecho esto el sobrenadante se guardó en un frasco de vidrio. Este proceso se repitió cinco veces para cada muestra obteniendo una cantidad de sobrenadante suficiente para la continuación de los análisis.

Una vez obtenido el centrifugado se procede a la determinación de calcio-magnesio, para esto se tomó una alícuota de 10 ml en un vaso Erlenmeyer, se agregó 5 ml de solución buffer pH 10, 5 gotas de clorhidrato de hidroxilamina, 5 gotas de cianuro de potasio (KCN) al 2%, 5 gotas de negro de eriocromo T, finalmente se titula con versenato 0.02 hasta que vire de purpura a azul.

Los pasos anteriores son para medir la concentración de los elementos calcio-magnesio en conjunto, sin embargo para saber la proporción del valor obtenido de cada uno de ellos es necesario saber al menos el valor de uno y por complemento se determina el valor del segundo. A continuación se muestra cómo se realizó la determinación del calcio.

En un segundo vaso Erlenmeyer se tomó una alícuota de 10 ml del centrifugado, se agregó 5 ml de hidróxido de sodio al 21%, 0.1 g de murexina y se tituló con versenato 0.02 N hasta que vire de rosa a violeta.

A la par de lo anterior se preparan dos blancos con los reactivos de CaCl_2 0.02 N para valorar el EDTA. La preparación fue la toma de una alícuota de 10 ml de CaCl_2 0.02 N, se le agregó 5 ml de solución buffer pH 10, 5 gotas de clorhidrato de hidroxilamina, 5 gotas de KCN al 2% y 5 gotas de negro de eriocromo T. posteriormente se tituló con versenato 0.02 N hasta que el compuesto vire de púrpura a azul.

Se apuntaron los datos del gasto de versenato para los análisis necesarios.

Para la determinación de calcio-magnesio se utilizó la siguiente fórmula:

$$Ca + Mg = \frac{ml \text{ EDTA } (N \text{ real})}{\text{Peso de muestra}} \times 100$$

Donde N real = (10 ml de cloruro de calcio/ gasto de EDTA del blanco) Nt

Donde Nt = cuando el EDTA se prepara con 1.8613 g, Nt = 0.01

Cuando el EDTA se prepara con 4 g, Nt = 0.02

-Determinación de sodio-Potasio

Para esta determinación se utilizó el sobrenadante de la técnica anterior, sin embargo para esta técnica se utilizaron diferentes reactivos para calibrar el espectrofotómetro de flama. Los reactivos utilizados fueron la solución extractora de acetato de amonio, solución patrón para la curva de calibración de Na^+ y K^+ , solución patrón de 100 ppm de K^+ y solución patrón de 100 ppm de Na^+ .

Una vez calibrado el aparato se procedió a tomar las lecturas de las soluciones problema, anotando las transmitancias que indica el medidor. El valor de la concentración que indica el aparato está dada por partes por millón (ppm).

Para la realización de los cálculos se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{Concentración de Na y K} = \frac{\text{ppm (Na ó K)} * 5}{\text{Peso atómico (Na ó K)}}$$