

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES
POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

**INFLUENCIA DE UNA PLANTACIÓN DE
Eucalyptus camaldulensis y *Opuntia* sp.,
EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL
SUELO DE LA ESTACIÓN EXPERIMENTAL
“MARIO ÁVILA HERNÁNDEZ”**

T E S I S

QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS FORESTALES



SECCIÓN GENERAL ACADÉMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

PRESENTA:

CÉSAR ORTIZ TORRES



Chapingo, Estado de México, diciembre de 2016

INFLUENCIA DE UNA PLANTACIÓN DE *Eucalyptus camaldulensis* y *Opuntia sp.*, EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO DE LA ESTACIÓN EXPERIMENTAL "MARIO ÁVILA HERNÁNDEZ"

Tesis realizada por César Ortiz Torres bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS FORESTALES

DIRECTOR:



DR. JESÚS DAVID GÓMEZ DÍAZ

ASESOR:



DR. FRANCISCO ALBERTO DOMÍNGUEZ ÁLVAREZ

ASESOR:



DR. ANTONIO VILLANUEVA MORALES

DEDICATORIA

A Johana

Gracias por tu apoyo en todo momento

A mis padres y hermana

Por su apoyo, comprensión y cariño.

AGRADECIMIENTOS

A mis amigos compañeros de generación por su apoyo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) que hizo posible mis estudios de Posgrado.

A la Universidad Autónoma Chapingo y a la División de Ciencias Forestales, por brindarme la oportunidad de formar parte de su alumnado y por el apoyo otorgado para llevar a cabo esta investigación.

Al equipo del laboratorio de Química de Suelos del Departamento de Suelos de la Universidad Autónoma Chapingo, por su asesoría y las facilidades otorgadas.

Al Dr. J. David Gómez Díaz por su valiosa dirección, paciencia y disponibilidad, sobre todo por sus enseñanzas que contribuyeron a la culminación de este trabajo. Muchas gracias

Al Dr. Francisco A. Domínguez Álvarez por sus sinceras observaciones para la culminación de este trabajo.

Al Dr. Antonio Villanueva Morales por su contribución y asesoramiento de este trabajo.

DATOS BIOGRAFICOS

Datos Personales

Nombre: César Ortiz Torres

Fecha de Nacimiento: 18 de mayo de 1983

Lugar de Nacimiento: Toluca, Estado de México

Profesión: Lic. en Ciencias Ambientales

Cedula Profesional: 08705261

Desarrollo Profesional:

Bachillerato: Centro de Bachillerato Tecnológico Industrial y de Servicios No. 203, Metepec, Estado de México.

Licenciatura: Licenciatura en Ciencias Ambientales. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca Estado de México

Maestria: Maestria en Ciencias Forestales

CONTENIDO

	Pág.
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE CUADROS	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT	x
OBJETIVOS	xi
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	6
2.1 Degradación del suelo	6
2.2 Suelo	7
2.3 Propiedades químicas del suelo	9
2.3.1 Materia Orgánica	9
2.3.2 Nitrógeno (N)	11
2.3.3 Fosforo (P)	12
2.3.4 Potasio (K)	13
2.3.5 pH	14
2.4 Propiedades físicas del suelo	15
2.4.1 Densidad aparente	15
2.4.2 Estabilidad de agregados	16
2.4.3 Profundidad	17
2.5 Rehabilitación	17
2.6 Las plantaciones forestales como estrategias para la restauración de suelos	20
2.7 <i>Opuntia ficus-indica</i>	21
2.8 <i>Eucalyptus</i> spp.	22
3. METODOLOGÍA	26
3.1 Caracterización de la zona de estudio	26
3.2 Identificación de las especies arbóreas y arbustivas	31
3.3 Estrategia de muestreo	31
3.4 Estrategia de análisis	34
3.4.1 Propiedades evaluadas	34
3.4.2 Propiedades físicas	34
3.4.3 Propiedades químicas	35
3.4.4 Análisis estadístico	35
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
4.1 Descripción de los rodales	37
4.2 Muestreos realizados en los rodales	38
4.3 Comparación entre los tipos de muestras por rodal	39

4.3.1 Propiedades físicas en los tipos de muestras por rodal	39
4.3.2 Propiedades químicas en los tipos de muestras por rodal	43
4.4 Comparación entre los rodales por tipo de muestra	48
4.4.1 Propiedades físicas de los rodales según tipo de muestra	48
4.4.2 Propiedades químicas entre los rodales según tipo de muestra	53
4.5 Comparación entre rodales	62
4.5.1 Propiedades físicas de los rodales	63
4.5.2 Propiedades químicas de los rodales	66
5. CONCLUSIONES	72
ANEXO	74
LITERATURA CITADA	78

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. <i>O. ficus-indica</i> y su fruto	21
Figura 2. Izquierda, <i>E. camaldulensis</i> y derecha, <i>E. resinifera</i>	23
Figura 3. Plantación de <i>Eucalyptus spp.</i>	26
Figura 4 Ubicación de la Estación Experimental "Mario Ávila Hernández" (La Siberia).	28
Figura 5. Ubicación de los cuadros muestrales	32
Figura 6. Forma y orden de los cuadros de 25 m ²	33
Figura 7. Ubicación de las muestras	33
Figura 8. Cantidad de árboles y arbustos por rodal	37

ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Influencia de los árboles sobre el ciclo de nutrientes	19
Cuadro 2. Descripción de las especies de eucaliptos presentes en el predio de estudio	24
Cuadro 3. Especies presentes en cada rodal	32
Cuadro 4. Tipo de muestra y descripción	33
Cuadro 5. Análisis realizados en laboratorio	34
Cuadro 6. Métodos usados para el análisis de propiedades físicas.	34
Cuadro 7. Métodos usados para el análisis de propiedades químicas	35
Cuadro 8. Número de submuestras realizadas por rodal	38
Cuadro 9. Comparación entre tipos de muestras de las propiedades físicas por cada rodal	41
Cuadro 10. Comparación entre tipos de muestras de las propiedades químicas por cada rodal	46
Cuadro 11. Comparación entre rodales de las propiedades físicas por cada tipo de muestra	53
Cuadro 12. Comparación entre rodales de las propiedades químicas por cada tipo de muestra	62
Cuadro 13. Comparación entre rodales de las propiedades físicas generalizadas	66
Cuadro 14. Comparación entre rodales de las propiedades químicas generalizadas.	71

**INFLUENCIA DE *Eucalyptus camaldulensis* Y *Opuntia ficus-indica* EN LAS
PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO**
**Influence of *Eucalyptus camaldulensis* and *Opuntia ficus-indica* in Physics and
Chemistries Soils Properties**
César Ortiz Torres, Jesús David Gómez Díaz

RESUMEN

Las plantaciones forestales son una opción viable para la forestación de áreas con suelos degradados, la utilización de especies con características de rápido crecimiento y fácil adaptabilidad, permiten acelerar los procesos de rehabilitación de las funciones ecológicas del ecosistema y del suelo. El objetivo de este estudio fue evaluar el impacto que puede tener una plantación de *E. camaldulensis* y *O. ficus-indica* establecida con fines de rehabilitación, a partir de algunas propiedades físicas y químicas del suelo, para determinar la influencia de la asociación entre estas dos especies en el mejoramiento de las propiedades del suelo. El Nt, K, P, MO y pH fueron las propiedades químicas analizadas, mientras que la EA, DAP y profundidad, fueron las físicas. A través de un análisis de varianza (ANOVA), se realizó la comparación de medias para identificar diferencias en las propiedades del suelo, cuando hay presencia de una especie o dos, así como entre los tipos de muestra. Los resultados indicaron que las dos especies estudiadas si influyen en las propiedades del suelo. La MO que aporta *E. camaldulensis* a través de su hojarasca y corteza desprendida influye en el mejoramiento de las propiedades químicas y físicas del suelo, mientras que la presencia de *O. ficus-indica* disminuye el contenido de nitrógeno en el suelo en rodales donde estuvo presente. Los altos coeficientes de variación encontrados en algunas propiedades (P, K y MO con CV > 47) pueden deberse a la manipulación y condiciones iniciales del terreno, ya que las dos especies influyen de forma puntual y no homogénea sobre la superficie.

Palabras clave: Plantación forestal, asociación, propiedades del suelo, coeficiente de variación.

ABSTRACT

The forest plantation is a viable option to the forestation zone with degraded soils. The use of species with quickly development and easy adaptability allow to increase the rehabilitation process of the ecological functions of the environment and the soil. The main aim of this study is evaluate the impact of the plantation of *E. camaldulensis* and *O. ficus-indica* established for rehabilitation, based on physical and chemical properties from soil, in order to determine the relationship between this two species on the improvement of the soil properties. The chemical properties analyzed were Nt, K, P, MO and pH, and the physical properties EA, DAP and depth. Through an analysis of variance (ANOVA), we made a comparison of the measures in order to identify the differences in soil properties, when F was significant (Pvalue<0.05) applied Tukey test. The results indicated that the two species have an influence in the soil properties. The MO that produces *E. camaldulensis* through its dead leaves and its fragmented bark has an impact in the improvement of the physical and chemical properties of the soil. While the *O. ficus-indica* reduced the nitrogen in stands where have presence. We found high coefficients of the variation in some properties (P, K, and MO with CV > 47), because of the manipulation and the field conditions, due to the two species have specific influence and not homogeneous in the surface area.

Key words: Forest plantation, association, soil properties, coefficient of variation.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el impacto de una plantación de *E. camaldulensis* y *O. ficus-indica* establecida con fines de rehabilitación, a partir de algunas propiedades físicas y químicas del suelo, para determinar la influencia de la asociación entre estas dos especies en el mejoramiento de las propiedades del suelo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Identificar las distintas especies arbóreas y arbustivas presentes en los rodales del área de estudio.
2. Realizar el muestreo de suelos en los rodales y analizar las muestras obtenidas en campo.
3. Evaluar y analizar los resultados del análisis de las propiedades físicas y químicas de los suelos para describir el impacto de las especies arbóreas y arbustivas sobre el suelo.

1. INTRODUCCIÓN

A través del tiempo el hombre ha aprovechado los recursos forestales de diferentes formas, ya sea para la obtención de alimentos (tanto para consumo y de sus animales), como fuente de recursos energéticos y para la obtención de materiales para la construcción (Zapata y Peña-Chocarro, 1998), sin embargo, muchas veces la sobre explotación de estos recursos ha llevado a la transformación del entorno, donde se lleva a cabo el aprovechamiento o el deterioro de los diversos ecosistemas.

Actualmente, a nivel mundial y regional uno de los principales problemas ambientales es la deforestación. México en 2010 reportó 440 600 ha degradadas, disminuyendo esta cantidad a 583 000 ha respecto al 2005 (FAO, 2015). A nivel mundial, del año 2000 al 2010 aproximadamente, 13 millones de hectáreas por año de bosques y selvas se perdieron por cambio de uso de suelo y causas naturales, cifra que se redujo en comparación con la década de 1990 al 2000 en la que se registraron pérdidas de 16 millones de hectáreas por año (FAO, 2010).

En México diversos estudios revelan que en la cultura maya la deforestación fue el factor principal que propició su desaparición (a pesar de que existen diversos factores que influyen en el colapso de una cultura), ya que en la necesidad por producir cada vez más alimentos para su población se necesitó de más tierras para generarlos y debido a la necesidad de extender sus cultivos se deterioraron otros recursos naturales como lo fue el suelo (Ochoa y Vargas, 1979). Lo mismo pudo haber pasado en Teotihuacán, se ha propuesto que el

colapso de esta cultura se debió, principalmente al agotamiento y deterioro de sus recursos naturales, ya que para cubrir las necesidades energéticas domésticas de cerca de 150 mil habitantes se utilizaban aproximadamente 30 mil toneladas de madera al año, implicando la tala de unas 30 mil a 60 mil ha de bosque para el desarrollo de esta civilización, lo que también trajo como consecuencia la pérdida de tierras fértiles y erosión (Ezcurra, 1992).

La problemática en el deterioro del recurso suelo que ha ocurrido a través de la historia ha generado que el ser humano establezca técnicas de manejo y rehabilitación e identifique especies para los ecosistemas que han sufrido algún deterioro en los que ha tenido influencia. Por ejemplo, en Chiapas, Levy *et al.* (2013) registran el uso del chujúm (*Ochroma pyramidale*) o conocido como “madera balsa”, el cual es un árbol utilizado de manera ancestral que ayuda a acelerar la recuperación de los suelos desmontados y degradados por fines agrícolas. En el centro de México el uso del ahuejote (*Salix bonplandiana*), es un árbol que fue y sigue siendo utilizado en la retención del suelo, para cortinas rompevientos y madera para combustible principalmente (Moreno-Calles *et al.*, 2013).

Sin embargo, en nuestro país no se ha limitado la utilización de especies nativas para la rehabilitación y restauración de ecosistemas. Con la conquista se introdujeron diferentes especies tanto frutales como maderables, tal fue el caso del eucalipto (*Eucalyptus globulus*) que se estableció en el Siglo XIX para mejorar las condiciones sanitarias del Valle de México (Hinke, 2000), y en la actualidad sigue estando presente en áreas naturales protegidas, aunque es

considerada una especie invasora (IMTA, Conabio, GECl, Aridamérica, & The Nature Conservancy, 2007).

Uno de los principales efectos derivados de las deforestaciones o pérdidas de vegetación es la erosión de suelos. Rey (1987) menciona que en el municipio de Texcoco, específicamente en la cuenca del río Texcoco, el principal factor en la pérdida de suelo han sido las actividades agrícolas intensivas en zonas no aptas y que además, estas han provocado la generación de tepetates, los cuales son estratos endurecidos que limitan la posibilidad de crecimiento en su superficie de especies arbóreas y/o cultivos.

Dentro de las principales acciones que se realizaron en el municipio de Texcoco para contrarrestar la erosión fueron las reforestaciones realizadas entre los años de 1973 y 1976 que se llevaron a cabo con fines de recuperación y protección de suelos (Pedraza, 1987). A través de los años estas actividades se han monitoreado, entre algunos de los trabajos que reportaron resultados se encuentra el de Adame-Martínez *et al.* (2000), quienes mencionaron que las reforestaciones realizadas generaron beneficios económicos (por la participación de la población en los trabajos realizados) y ambientales. En otro estudio, (Ávila-Campuzano *et al.* (2011) concluyeron que con las diferentes especies forestales utilizadas (cedro, pinos, eucaliptos y casuarinas), las casuarinas y los cedros son las especies que formaron suelo en menos tiempo y que la influencia sobre la restauración de los pinos y los eucaliptos fue menor.

Ortiz *et al.* (1987), evaluaron otras técnicas como son el terraceo y subsoleo para contrarrestar la erosión, las cuales ayudaron en la recuperación de suelo disminuyendo la erosión hídrica, sin embargo, registraron que la realización de estas actividades implicó inversiones a largo plazo generando altos costos, los cuales, en algunos casos, fueron redituables y en otros poco redituables.

Asteinza y Rey (1987) analizaron la eficiencia de los nopales (*Opuntia ficus-indica*) para la recuperación de suelos y su efecto en el control de la pérdida de tepetate, concluyendo que estos ayudan en la recuperación y se adaptan a las condiciones limitantes del suelo.

La Universidad Autónoma Chapingo estableció en 1968 un área experimental llamada Cuauhxinachtli, que se encuentra al Este de esta institución, en la cual se introdujeron diferentes especies de árboles con la finalidad de estudiar (de manera didáctica) su desarrollo y adaptación al clima de la región, de los cuales 49 fueron del género *Eucalyptus*, 16 de coníferas, de las cuales 12 corresponden al género *Pinus*, 6 de *Acacias* y 1 de *Casuarina*, 1 de *Schinus molle* L. y 1 de *Fraxinus udhei* (Musálem *et al.*, 1978).

Ávila (1963) indicó que en la plantación denominada “La Siberia” actualmente denominada “Mario Ávila Hernández”, entre 1960 y 1962 se plantaron *Pinus montezumae*, *Pinus michoacana*, *Eucalyptus camaldulensis* var. *brevirostis*, *Eucalyptus resinífera* y *Schinus molle*, de las cuales el eucalipto fue el que más éxito tuvo en su establecimiento.

En la actualidad, dentro de la Estación Experimental “Mario Ávila Hernández” (EEMAH) es posible apreciar a los eucaliptos como la especie que domina, sin

embargo, también el nopal (*O. ficus-indica*) tiene presencia en la plantación, la especie ha colonizado la zona, creciendo junto a los árboles, tal vez debido a su gran plasticidad a los distintos climas y suelo propiciadas por sus características morfológicas y fisiológicas (Nobel, 2002; Lozano, 2011; Neffar *et al.*, 2013;) que permiten que esta especie en combinación con las demás ayuden en mejorar las condiciones de los suelos así como en el combate contra de desertificación. Con base en lo anterior, en el presente trabajo se planteo como objetivo general evaluar el impacto de una plantación de *Eucalyptus camaldulensis* y *Opuntia ficus-indica* establecida con fines de rehabilitación a partir de algunas propiedades físicas y químicas del suelo, para determinar la influencia de la asociación entre estas dos especies en el mejoramiento de las propiedades del suelo.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Degradación del suelo

De acuerdo a la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CNULD) (DOF, 1995), la *degradación de tierras* (que para los fines este documento, *tierra*, está definida como el sistema bioproductivo terrestre que comprende al suelo), se concibe como "*la reducción o la pérdida de la productividad biológica o económica y la complejidad de las tierras agrícolas de secano, las tierras de cultivo de regadío o las dehesas, los pastizales, los bosques y las tierras arboladas, ocasionada en zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, por los sistemas de utilización de la tierra o por un proceso o una combinación de procesos, incluidos los resultantes de actividades humanas y pautas de poblamiento*".

Los principales problemas que suelen incidir en la degradación del suelo están influenciados por el hombre a través de la explotación irracional forestal o agrícola, cambios de uso de suelo, lo que provoca un deterioro, tanto en las propiedades químicas por medio de la pérdida de nutrientes, como en las físicas debido a su compactación, pérdida de estructura, entre otras; y por fenómenos naturales a través de tornados, deslaves, incendios etc. (Bruijnzeel, 1998; Cotler, 2010; Osman, 2014). Estas amenazas influyen en las funciones de los suelos provocando disminución en su producción y almacenamiento de biomasa, en la filtración y transformación de nutrientes, erosión, pérdida de

materia orgánica, contaminación, salinización, compactación y pérdida de biodiversidad (Camps-Arbestain *et al.*, 2008),

En México, para el año 2013 se reportó una cifra preliminar de 75.6 millones de hectáreas con problemas de degradación de suelo y los costos totales utilizados para su remediación se incrementaron 1.6 veces para el año 2013 con respecto al 2003 (INEGI, 2014).

Las principales causas involucradas en la degradación de los suelos del país son las actividades agrícolas y pecuarias con el 35 % de la superficie nacional degradada, el 7.4 % relacionada a la pérdida de la cubierta vegetal y el resto está dividida entre urbanización, sobreexplotación de vegetación y actividades industriales (SEMARNAT, 2013). También, a nivel nacional para el año 2010 se reportaron 80 071.51 ha de tierras que fueron intervenidas con obras de conservación y restauración de suelos, mientras que en el Estado de México se intervinieron 1 318.41 ha (CONAFOR, 2014).

2.2 Suelo

Existen varias definiciones acerca del suelo, la USDA - NRCS (2006) por sus siglas en inglés (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos – Servicio de Conservación de Recursos Naturales), mencionan una forma común de describirlo: *“el medio natural para el desarrollo de las plantas terrestres, ya sea que tenga o no horizontes discernibles”*; o por medio de un concepto más desarrollado: *“es un cuerpo natural que comprende a sólidos (minerales y materia orgánica), líquidos y gases que ocurren en la superficie de la tierra, que*

ocupa un espacio, y que se caracteriza por uno o ambos de los siguientes: horizontes o capas que se distinguen del material inicial como resultado de las adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones de energía y materia o por la habilidad de soportar las plantas enraizadas en un ambiente natural”.

Los suelos a su vez, pueden clasificarse en agrícolas y forestales debido a que sus propiedades tanto químicas como físicas poseen características diferentes debido a la vegetación que presentan. Por ejemplo, los suelos forestales pueden contener mayores cantidades de materia orgánica ya que se desarrollan bajo condiciones naturales y son influenciados permanentemente por la vegetación, mientras que los suelos agrícolas suelen contener menores cantidades y verse afectados continuamente por los trabajos de laboreo que modifican su estructura constantemente (Osman, 2013a).

Este recurso natural se vuelve de vital importancia para el hombre, ya que influye en las economías, culturas, así como en la supervivencia y bienestar del hombre, además, debido a que su génesis y regeneración es muy lenta, se le debe considerar como un recurso no renovable y escaso (Gardi *et al.*, 2014).

El suelo siempre está expuesto a diversos cambios tanto en su formación (cambios en sus propiedades físicas y químicas) como en su degradación. Existen diversas amenazas con la capacidad de influir en las funciones de los suelos (producción y almacenamiento de biomasa, filtración y transformación de nutrientes y agua, etc.) tales como la erosión, la pérdida de materia orgánica, la contaminación, salinización, compactación, pérdida de biodiversidad y deslaves (Camps-Arbestain *et al.*, 2008).

Conocer el estado físico y químico del suelo es importante antes de efectuar una restauración con vegetación pues contribuye a conocer sus condiciones y poder realizar una fertilización que asegure los nutrimentos esenciales para el crecimiento de las plantas, además de permitir seleccionar plantas adecuadas que tengan la capacidad de sobrevivir en las condiciones del sitio (Hao *et al.*, 2016). Monitorear cada cierto tiempo sus propiedades, refuerza la correcta rehabilitación así como su manejo (Jung *et al.*, 2012).

2.3 Propiedades químicas del suelo

2.3.1 Materia Orgánica

Existen tres categorías para clasificar la materia orgánica de los suelos en base a sus estados de descomposición (materia orgánica fresca o sin descomponer, parcialmente descompuesta y completamente descompuesta), pero independientemente de su estado, el beneficio que aportan a los suelos se da en la agregación de partículas al suelo, que aunque puede parecer solo un efecto físico, la complejidad de la agregación involucra importantes interacciones en los procesos físicos, químicos y biológicos (Osman, 2013a).

La acumulación y cantidad de la materia orgánica en el suelo está controlada por la composición y cantidades de residuos de plantas, por el clima, la textura del suelo, actividades microbianas, reacciones químicas (Haider y Guggenberger, 2005). Además, tiene la capacidad de influir en las actividades biológicas del suelo, como pueden ser el reciclado de nutrientes, procesos de hidrólisis, almacenamiento de carbono, nitrógeno en la biomasa microbiana,

entre otros (Alvear *et al.*, 2007). Debido a que esta propiedad forma parte de distintos procesos físicos y químicos, es considerada como un indicador químico que permite conocer la calidad de los suelos, ya que a través de ésta, es posible conocer la fertilidad del suelo, su estabilidad y grado de erosión, así como el potencial productivo (García *et al.*, 2012).

Hao *et al.* (2015), mencionan que en los sitios donde se han efectuado restauraciones, el contenido inicial de materia orgánica junto con el estado inicial de la porosidad total, son factores clave para el establecimiento de una vegetación idónea en los sitios degradados. Realizar estudios al inicio y después de aplicada determinada rehabilitación, permitirá conocer la evolución de los tratamientos efectuados a la zona e indicar su estado después de determinado tiempo.

La utilización de árboles en rehabilitaciones de suelos degradados ayudan a que los aportes de MO al suelo a través de su hojarasca, ramas, corteza y raíces muertas, generen cambios y mejoras en la estructura del suelo, aumentando la velocidad de infiltración y mejorando su porosidad, capacidad de retención de humedad y densidad aparente (Murray *et al.*, 2011). Las raíces de los árboles pueden ser una fuente de carbono para el suelo y otros organismos que puedan influir en efectos que van desde las interacciones mutualistas y parasitarias (Kuyper y de Goede, 2005).

2.3.2 Nitrógeno (N)

El nitrógeno es un elemento indispensable para todos los organismos, sin embargo, en el suelo, solo del 1 a 2 % del nitrógeno total (Nt) está presente de forma inorgánica (ya sea como amonio, nitrato o nitrito) para que sea aprovechado por las plantas (Semoka, 2008). A su vez, es el principal elemento limitante en la nutrición de las plantas, existiendo diferentes formas para minimizar sus pérdidas en el suelo, ya sea por medio de prácticas para el control de la erosión o a través del uso de fertilizantes (Coyne y Frye, 2005; Read, 1991). Diversas especies de plantas pueden ayudar a fijar nitrógeno al suelo aunque éstas pueden tener una alta demanda en el consumo de fósforo como es el caso de las actinorrizas (Kuyper y de Goede, 2005).

Esta propiedad (como el fósforo y potasio) es considerada como un indicador en la calidad del suelo, debido a la relación química que tiene el suelo (con la disponibilidad del nutriente) y la planta (absorción nutrimental para su desarrollo), permitiendo conocer su productividad y su calidad ambiental (García *et al.*, 2012). La cantidad de N que hay en el suelo está relacionada con su fertilidad provocando un desarrollo rápido de los cultivos a través del crecimiento y fructificación de las plantas (León, 1991a).

2.3.3 Fósforo (P)

El fósforo es un elemento esencial para el desarrollo de los organismos vivos y se encuentra en el suelo en tres formas: disuelto en solución suelo, de forma orgánica e inorgánica (Sims y Vadas, 2005). Este elemento también puede aparecer como fosfato de aluminio, fosfato de calcio y como compuestos orgánicos tales como fosfolípidos, inositoles, ácidos nucleicos, etc. (Osman, 2013a).

La principal fuente que aporta fósforo al suelo es la *apatita* y puede ser liberado a través de procesos químicos, por microorganismos o por las raíces de las plantas, también, la forma disponible para las plantas es como ortofosfato, H_2PO_4^- (para intervalos de pH de 2.2 - 7.2) o HPO_4^{2-} (para intervalos de pH de 7.2 - 12.4) (Mullen, 2005).

De acuerdo a Read (1991), en ecosistemas donde se presentan suelos erosionados, este elemento es escaso y afecta la productividad primaria de la vegetación. Los árboles contribuyen en la rehabilitación de suelos degradadas asimilando el fósforo en la fitomasa, la cual es depositada después en forma de residuos, acumulándose sobre el mantillo y por medio de la mineralización se vuelven a liberar iones de ácido fosfórico en el suelo pudiendo ser reutilizados por las plantas (Fassbender y Bornemisza, 1994). En plantaciones forestales una práctica que es empleada para corregir deficiencias de fósforo, reducir los niveles de toxicidad del aluminio y favorecer la disponibilidad de nutrimentos como el calcio, magnesio y molibdeno, es el encalado de los suelos (Alvarado y Fallas, 2004), recurriendo también a la inoculación con micorrizas para

aumentar la eficiencia en el aprovechamiento de los nutrientes del suelo, especialmente del fósforo (Álvarez-Sánchez *et al.*, 2013).

2.3.4 Potasio (K)

El potasio es el mayor constituyente de los suelos y las plantas, encontrándose en el suelo en rangos de 0.4 - 30 g K kg⁻¹ en cuatro formas distintas: como solución, de forma intercambiable, fijo o no-intercambiable y estructural, así también, la disponibilidad del K para las plantas está relacionado con la forma y estructura química de los minerales del suelo (Huang *et al.*, 2005).

Este elemento está clasificado dentro de los macroelementos en forma intercambiable y soluble. En climas templados es derivado de la glauconita, los feldespatos y las micas, además de que ayuda a disminuir la transpiración en las plantas, contribuyendo a que estas toleren más las sequías e indirectamente a la tolerancia de heladas y enfermedades (León, 1991b).

La erosión por escurrimiento y la percolación son fenómenos que causan pérdidas de K en el suelo (Fassbender y Bornemisza, 1994), debido a que los procesos de lavado sustraen los nutrientes de la solución del suelo y enriquecen los suelos con cationes insolubles (Gardi *et al.*, 2014).

2.3.5 pH

El pH es una propiedad que puede influir en propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, debido a que tiene la capacidad de afectar la solubilidad de sus minerales, siendo muy variable porque depende de las concentraciones de CO₂ en el aire del suelo y de las concentraciones de sales y/o sodio en las soluciones del suelo (Bolan y Kandaswamy, 2005). Es considerada como un indicador en la calidad del suelo por la relación con su actividad química y biológica, con los límites de crecimiento de las plantas y la actividad microbiana (García *et al.*, 2012).

La mayor parte de los suelos forestales son más ácidos que los pastizales y suelos agrícolas debido a su continua producción de ácidos orgánicos y CO₂ proveniente de la descomposición de hojas, además de que los árboles pueden acidificar el suelo por la absorción del calcio, magnesio y otras bases del suelo (Osman, 2013a). El encalado del suelo es una técnica utilizada para corregir elevados niveles de acidez, ya que incrementa el pH, mejora la estructura y aumenta la actividad biológica (Meuser, 2013).

Generalmente, en procesos de restauración o rehabilitación se busca que el pH del suelo se encuentre entre valores de 6 y 7.5, ya que el nivel óptimo de desarrollo de las plantas está en estos rangos; cabe destacar que muchas otras se han adaptado a valores fuera de este rango (Gardi *et al.*, 2014).

2.4 Propiedades Físicas

2.4.1 Densidad aparente

La densidad Aparente (DA) es definida como el peso por unidad del volumen de un suelo secado en estufa, el cual es expresado en gramos por centímetro cubico (g cm^3) y es una propiedad ampliamente utilizada para calcular la porosidad así como en la estimación del peso de un volumen de suelo (León, 1991).

Esta propiedad puede variar debido al contenido de materia orgánica, textura, compactación, por la porosidad del suelo y por diferentes profundidades, pues sus valores tienden a incrementarse con la profundidad por causa de la escasez de materia orgánica y agregación (Osman, 2013a; 2013b), mientras que en el primer horizonte suele ser alto debido a una mayor actividad biológica (Alvarado y Forsythe, 2005). La relación directa que tiene con la MO se da de forma inversa y tiene como consecuencia el aumento en la porosidad del suelo, mejoras en la velocidad de infiltración y en la capacidad de campo (Murray *et al.*, 2011).

Un aumento en los valores de esta propiedad puede indicar procesos de degradación, así como cambios en la estructura del suelo, afectando el crecimiento de las plantas debido a la disminución de la conductividad hidráulica y a la capacidad de retención de agua (Blanco-Sepúlveda, 2009).

2.4.2 Estabilidad de Agregados

Esta propiedad es considerada como una propiedad dinámica, expresa la resistencia de los agregados a romperse cuando son sometidos a procesos potencialmente perturbadores, debido a esto, su variación está en función a la vulnerabilidad de fuerzas externas destructivas (Yoder, 1936; Hillel, 1998b). Se considera buena indicadora en la calidad del suelo, se relaciona directamente con la erosión potencial de un suelo y la infiltración del agua (García *et al.*, 2012). La cantidad y distribución (grandes y pequeños) de agregados estables e inestables pueden ser usadas como indicadores de la estabilidad o desestabilidad de los agregados de los suelos, los cuales a su vez están estrechamente relacionados con el dinamismo de la materia orgánica, la calidad y la vegetación (Márquez *et al.*, 2004).

El conocimiento de esta cualidad ayuda a conocer el grado de deterioro en el suelo, ya que cuando éste se degrada en su superficie y en el subsuelo, se ve reducida la infiltración del agua de lluvia y por tanto se incrementa el escurrimiento y la erosión del suelo (Castellanos-Navarrete *et al.*, 2013).

En suelos degradados, la principal forma de mejorar esta propiedad es con el aporte de material orgánico (hojas, tallos, enmiendas, entre otros), ya que éste produce mejoras en las condiciones físicas del suelo, además de estar directamente relacionado con la estabilidad de los agregados (Betancourt *et al.*, 1999). Los ácidos húmicos y fúlvicos son las principales sustancias derivadas de la materia orgánica que permiten el incremento de esta propiedad (Gutiérrez *et al.*, 2015; Rosales-Serrano *et al.*, 2015).

2.4.3 Profundidad

La profundidad del muestreo se realiza según el objetivo y se comienza a medir después de remover los residuos orgánicos superficiales (SEMARNAT, 2003). Debido a los largos procesos de desarrollo en los suelos, esta propiedad también se encuentra dentro de los principales indicadores de la calidad del suelo, ya que su disminución puede inferir procesos erosivos o compactaciones y en procesos de restauración su incremento ayuda a identificar buenas prácticas de administración del suelo (García *et al.*, 2012).

Esta característica puede variar en distintos lugares, por ejemplo, los suelos de los valles son más profundos que los de las colinas. Sin embargo, en zonas con mayor actividad biológica raramente se extiende a más de dos o tres metros y en muchos casos no rebasa un metro (Hillel, 1998a).

Durante los procesos de erosión (principalmente, hídricos y eólicos) el suelo va perdiendo masa y disminuye su profundidad (Brunel y Seguel, 2011), por lo que, con la aplicación de prácticas de rehabilitación se frena esta pérdida, buscando aumentar o recuperar la profundidad perdida.

2.5 Rehabilitación

La recuperación de espacios degradados es prioridad para que los ecosistemas puedan recuperar sus procesos ecológicos después de haber sido degradados por usos insostenibles de los suelos, como son la transformación de áreas no

aptas a tierras de cultivo, sobrepastoreo, sobre explotación de masas forestales etc. (Williams-Linera *et al.*, 2011).

Un ecosistema que tiene algún tipo de degradación, daño o destrucción total ya sea por causas antropogénicas o naturales puede ser propicio para ser restaurado o rehabilitado. La Society for Ecological Restoration Science & Policy Working Group (SER) (2002), hace diferencias entre la restauración y la rehabilitación, mencionando que la primera se enfoca en regresar un ecosistema a su estado original (o trayectoria histórica) mientras que la segunda, se destaca por la reparación de los procesos ecológicos, la productividad y los servicios de un ecosistema sin llegar a su estado original.

Choi (2007), propone que la orientación futura de las restauraciones deberían tomar las siguientes consideraciones: *“1) el restablecer ecosistemas que sean capaces de mantenerse en el futuro, 2) considerar diversas metas y trayectorias alternativas para los cambios impredecibles, 3) centrarse en la rehabilitación de las funciones de los ecosistemas más que en la recomposición de especies o la apariencia estética del paisaje, y 4) reconocer su identidad como una ciencia aplicada “sobre-valorada” dentro de un marco teórico económica y socialmente aceptable”*.

La utilización de árboles para cambiar las propiedades del suelo puede ayudar en el incremento de la fertilidad del suelo y en la presencia de herbáceas, así como en la producción de biomasa (Weltzin y Coughenour, 1990). Esto se debe a que la descomposición de hojarasca es una buena fuente de nutrientes que ayudan en el mejoramiento de las propiedades químicas de los suelos, además

de que las raíces también pueden ayudar en el mantenimiento de sus propiedades físicas (Mishra, Sharma y Gupta, 2003). Las tasas de acumulación de hojarasca, producción de biomasa, acumulación de carbono, así como la de nutrientes, alcanzan su máximo nivel durante las primeras décadas de restaurado el rodal y declinan durante su etapa de maduración (Lugo *et al.*, 2004). A continuación, se presenta el Cuadro 1, donde se ejemplifica como los árboles influyen en los ciclos de nutrientes.

Cuadro 1. Influencia de los árboles sobre el ciclo de nutrientes.

Propiedades en los ciclos de nutrientes	Implicaciones de la restauración
Influencia en la tasa de absorción	Capacidad de crecer en el sitio
Influencia en la tasa de retranslocación	Regula la calidad de hojarasca, reduce el requerimiento de absorción.
Regresan al suelo forestal	Oportunidad para el reciclaje y mejora de la fertilidad del suelo.
Acumulación de biomasa	Función de sumidero y retención de nutrientes en el suelo.
Se distribuyen en las capas entre, sobre y bajo el suelo	Determina la oportunidad para construir la fertilidad del suelo (bajo el suelo) vs. circulación de nutrientes encima del suelo.
Influyen en la calidad de tejido	Influencia sobre la descomposición y los índices de consumo por hongos, bacterias y organismos del suelo.
Eficiencia de reciclado (o reciclaje)	La alta eficiencia favorece a las plantas vivas (re uso), la baja eficiencia hace más disponible los nutrientes para el resto del sistema.
Eficiencia de almacenamiento	La alta eficiencia favorece la función del sumidero.

Fuente: (Lugo *et al.*, 2004).

En general, cuando se establece una plantación forestal en áreas degradadas hay mejoras tanto en las propiedades del suelo y en la vegetación, sin embargo, cuando los rodales naturales son reemplazados por plantaciones puede ocurrir un deterioro en el ecosistema natural (Osman, 2013b).

2.6 Las plantaciones forestales como estrategias para la restauración de suelos

Las plantaciones forestales están definidas como aquellas formaciones forestales que han sido establecidas en el contexto de un proceso de forestación o reforestación (FAO, 2002). De esta forma la forestación está definida como: *el establecimiento de árboles mediante plantación y/o siembra deliberada en tierra que, hasta ese momento, no había sido clasificada como bosque o selva*; y la reforestación como: *"la regeneración natural o restablecimiento del bosque a través de la plantación o de la siembra deliberada en tierra que ya es de uso forestal"* (FRA, 2015).

Para México, de acuerdo a cifras de la FAO (2015), la superficie plantada ha ido en aumento, pasando de 3 mil hectáreas plantadas en 1990 a 87 mil hectáreas para el 2015, también, el área de bosque gestionada con fines de protección contra erosión e inundaciones para el 2015 fue de 100 mil hectáreas.

Osman (2013), menciona que las plantaciones forestales tienen influencia sobre las propiedades químicas de los suelos, ya que de acuerdo con la tasa de descomposición de la hojarasca depositada por los árboles (que depende de la dureza o densidad del árbol, morfología, contenido de lignina, longevidad del follaje o el contenido de componentes hidrosolubles), las raíces y sus diversas interacciones con el suelo, pueden generar cambios (principalmente en los primeros centímetros) en propiedades como el pH, el contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, carbono y nitrógeno total o en el fósforo disponible.

2.7 *Opuntia ficus-indica*

La *Opuntia ficus-indica* (Figura 1) es conocida en el mundo con distintos nombres (Tapia, beles, sabra, etc.), pero es en México donde se registra la mayor cantidad de nombres (amarilla, cenizo, nopal de castilla, nopalito, etc.), lo que evidencia su importancia en la cultura del país. Dentro de sus principales características es la ausencia total o parcial de las espinas, cladidos, areolas y pericarpelos de mayor longitud; frutos muy anchos y gran variabilidad de color, longitud de semilla, así como peso y longitud de la pulpa del fruto (Reyes-Agüero *et al.*, 2005).



Figura 1. *O. ficus-indica* y su fruto.

La *O. ficus-indica* además de ser aprovechada para cosechar sus frutos y cladidos que pueden servir como alimento para los humanos o forraje para animales, también es utilizada en diferentes programas de prevención contra la erosión, así como para combatir la desertificación debido a su capacidad de adaptación a diferentes climas, además de la facilidad en su crecimiento sobre

suelos con degradación extrema, donde otros cultivos difícilmente pueden crecer (Reynolds y Arias, 2001).

Nobel *et al.* (1987), mencionan que en condiciones naturales este tipo de cactáceas puede sobrevivir con bajas necesidades nutrimentales en condiciones silvestres, con suelos arenosos en regiones áridas y semiáridas, igualmente, si es fertilizada principalmente con nitrógeno, además de fósforo y potasio, puede crecer con mayor vigor. Las especies nativas suelen reunir mejores características de desarrollo para ser utilizadas en las rehabilitaciones y la *O. ficus-indica* como tal, tiene la capacidad de adaptarse a las condiciones locales de la zona y desarrollarse adecuadamente y poder proveer frutos comestibles tanto para animales como para humanos, como una especie de doble función (Jaiyeoba, 2001).

2.8 *Eucalyptus* spp.

Actualmente en el predio de EEMAH la especie del *Eucalyptus camaldulensis* es la que predomina en el área, a pesar de que también fue introducido el *Eucalyptus resinifera* y otras especies (Figura 2).



Figura 2. Izquierda, *E. camaldulensis* y derecha, *E. resinifera*.

El género *Eucalyptus* pertenece a la familia Myrtaceae, subfamilia Leptospermoideae, con la posición opérculo (solo o doble) cubriendo los brotes florales, la falta de pétalos es una distinción de los eucaliptos dentro de esta familia y a su vez se conforma con aproximadamente 600 especies (Hill, 1994). En el Cuadro 2 se describen brevemente las dos especies antes mencionadas.

Cuadro 2. Descripción de las especies de eucaliptos presentes en el predio de estudio.

Característica	Especie	
	<i>E. camaldulensis</i>	<i>E. resinífera</i>
Forma del tronco	Árbol de gran porte, de 24 a 36 m de altura, tronco recto, color claro con tintes cremosos y ligeramente rosados, de 5 a 10 m de largo, con DAP de 0.9 a 2.1 m.	Árbol de gran porte, de tronco recto, mide de 10 a 30 m de altura y de 0.9 a 1.5 m de DAP, Ramillas colgantes
Copa / Hoja	Frondosa de 5 a 15 m de altura, irregular y de amplia cobertura (hasta 20 m). Las ramas extendidas y ramillas péndulas, color rosado a rojo oscuro. Hojas aromáticas, las juveniles lanceoladas, opuestas, pecioladas: las adultas lanceoladas, simples y falcadas, de 10-25 cm de largo, por 1 a 3 cm de ancho; las maduras coriáceas.	Las hojas juveniles, ovado-lanceoladas, son pecioladas y alternas; las adultas son lanceoladas, falcadas y delgadas de 8 a 15 cm de largo por 12 a 28 mm de ancho, con peciolo de 11 mm de largo con tintes rosados; las nervaduras secundarias muy marcadas y divergen en ángulo de más o menos 45° con la central; la marginal está algo separada del borde.
Corteza	Caduca, color café rojizo, dispuesta en tiras lisas que se desprenden dejando el tronco liso.	Es persistente, parda y rugosa y hendida en pequeñas placas. La madera es color rosado
Flor	Pimpollos o botones florales amarillos, pedicelados, dispuestos en umbelas axilares plurifloras o de varias flores (5 a 10), sobre pedúnculos cilíndricos. Opérculo comúnmente rostrado, no mayor de 4 a 6 mm de largo con el receptáculo del mismo largo que el opérculo. Anteras con las tecas paralelas, dehiscentes por hendidura longitudinal.	Es muy pequeña, pedicelada, dispuestas en umbelas de seis a 12 flores, sustentadas por un pedúnculo alargado de hasta 2.5 cm, algo aplanado; las anteras ovoides, son dehiscentes por hendiduras longitudinales. Los pimpollos miden menos de 3 mm de diámetro por 4 mm de ancho, con el opérculo cónico y con ápice agudo. El tubo del receptáculo menor al largo del opérculo y más ancho.
Fruto	Café claro, hemisférico, de 4 a 8 mm de largo, con las valvas bien exsertas.	Pedicelado, hemisférico, color oscuro de 5 mm de diámetro y 5 mm de largo con valvas triangulares agudas y exsertas.
Semilla	Semilla: color amarillo, numerosas y con gran cantidad de semillas abortadas.	Anguladas y de color negro muy pequeñas y las abortadas color café claro alargadas.
Propagación	Por semillas y por injerto.	Por semillas.
Hábitat	Soporta salinidad alta y terrenos húmedos hasta secos en zonas áridas.	Crece en lugares templados y cálidos.

Fuente: (Gutiérrez *et al.*, 2006).

Debido a la gran plasticidad genético-ecológica que tiene el género *Eucalyptus*, estos tienen la capacidad de adaptarse a ambientes marginales con suelos deficientes en nutrientes, sitios con poca disponibilidad de agua y alta insolación (Granados-Sánchez y López-Ríos, 2007).

La importancia económica de estos árboles se debe principalmente a que son utilizados para la elaboración de vigas, como fuente de pulpa y leña (Delgado-Matas y Pukkala, 2013) además de que, en años recientes se ha investigado sobre el potencial de su biomasa para transformarla en etanol (Gonzalez *et al.*, 2011).

La corteza desprendida de los *Eucalyptus spp.* puede conducir a cambios en la distribución de Ca^{2+} sobre el suelo, así como de otros cationes cercanos al árbol (Weltzin y Coughenour, 1990).

3. METODOLOGÍA

3.1 Caracterización de la zona de estudio

De acuerdo con Ávila (1963), en el predio “La Siberia”, se estableció una plantación experimental con fines de recuperación de suelos erosionados en 25 lotes de aproximadamente 1 ha de superficie cada uno, subdividido en 6 parcelas, utilizando las siguientes especies: *Eucalyptus camaldulensis*, *E. resinifera*, *Schinus molle*, *Pinus michoacana* y *Pinus montezumae*. Estos árboles fueron establecidos en diferentes años, iniciando en 1960 los lotes 1 a 5, en 1961 de 6 a 15 y finalmente en 1963 de 16 a 25, con un espaciamiento de 2 m para las parcelas uno y dos, 2.5 m para las parcelas tres y cuatro y 3 m para las parcelas cinco y seis. En la actualidad la especie que predomina en el área es el *E. camaldulensis* (Figura 3).



Figura 3. Plantación de *Eucalyptus spp.*

Durante el establecimiento de las especies fueron utilizados dos métodos de plantación, el español y el de cepa común, los cuales se definen a continuación:

El método de siembra español *"es aplicado en terrenos con pendiente, consiste en hacer una cepa con un ancho de 40 cm y de igual profundidad, después a su alrededor se realiza un cajete de 1 m de diámetro con profundidad de 10 a 15 cm en su parte más honda para poder captar agua y promover el desarrollo del árbol, cabe mencionar que la planta no debe quedar en la parte más honda, porque el agua no debe inundar a la planta o al menos que suceda en forma temporal. Ya establecida la planta se colocan tres piedras o más en torno a su base, la finalidad de estas es evitar el enmalezamiento, dar protección contra incendios y pisoteo de animales, amortiguar bajas temperaturas y retener el calor del sol"* (Pimentel, 2007).

El método de siembra de tipo cepa común *"consiste en un agujero (con variantes de tipo cilíndrica, cono truncado, cubica y pirámide truncada) que puede presentar diferentes dimensiones de acuerdo a las condiciones del terreno normalmente de 40 x 40 x 40 cm, es recomendada para suelos con poca pendiente y profundos, además de realizar las cepas con una distribución espacial a "tresbolillo" (Pimentel, 2007).*

a) Localización

La investigación se llevó a cabo en la Estación Experimental “Mario Ávila Hernández”, también conocida como la “Siberia” (Figura 4). Ubicada entre los paralelos longitud 98° 50' 45.92" y 98° 51' 28.17", y latitud 19° 28' 18.30" y 19° 27' 41.00"

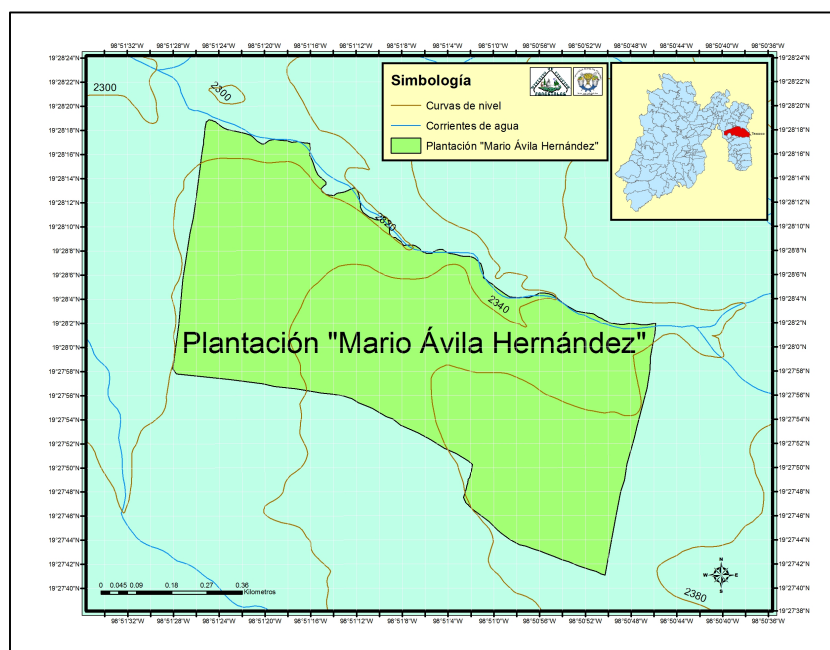


Figura 4. Ubicación de la Estación Experimental Mario Ávila Hernández (La Siberia).

b) Fisiografía

La zona estudiada se encuentra dentro de la provincia (X) del “Eje neovolcánico”, subprovincia (57) de “Lagos y volcanes del Anáhuac”, con presencia de laderas tendidas y con sustrato geológico de rocas ígneas (200-0/02) (INEGI, 2000a).

c) Geología

Las rocas presentes son ígneas extrusivas, dominando la toba volcánica de naturaleza ácida (INEGI, 2000b), además Gómez-Díaz (Comunicación personal, 2016), menciona que la zona está conformada por abanicos aluviales de cenizas volcánicas depositadas por las corrientes fluviales de la Sierra Nevada, con interestratificaciones de cenizas volcánicas depositadas por varias erupciones volcánicas, así como algunos flujos de lava basáltica y en la superficie se encuentra tova volcánica de naturaleza ácida.

d) Edafología

Los suelos que predominan en la zona son someros, presentan poca profundidad, la cual se ve limitada por la presencia de tepetate (tova volcánica de naturaleza ácida), son un recurso potencial para el establecimiento de pastizales o fines forestales y a su vez se encuentran clasificados dentro de los leptosoles (INEGI, 2004; IUSS y Grupo de trabajo WRB, 2007).

Ávila (1963), reportó que los suelos poseen bajos niveles de fertilidad, clasificándolos como tipo Serie Coatlinchan, que presentan profundidades promedio de 0-20 cm en un 75 % de su superficie, así mismo, el material tepetatoso aflora en un 20 % de ella, clase textural migajón arcilloso-arenoso, color gris rojizo oscuro junto con café claro, con baja fertilidad y baja capacidad de retención de humedad. Los suelos presentes son derivados del

material que no fue erosionado, dado que en toda la zona la erosión hídrica fue muy severa y en varias partes el suelo se perdió por completo y se tienen los afloramientos de tepetates.

e) Clima

El clima se determinó a partir de los datos de la estación meteorológica Chapingo, presenta clima templado con verano fresco largo, el más seco de los subhúmedos, con régimen de lluvias de verano y un porcentaje de precipitación invernal menor a 5, con poca oscilación anual de las temperaturas medias mensuales, con marcha anual de la temperatura del tipo Ganges (Cb (w_o) (w) (i') g).

f) Hidrología

El principal cauce presente en la zona es el río San Bernardino, esta ubicado al Norte de la plantación y desemboca al arroyo Huexotla. Entre otros afluentes cercanos se encuentran el río Coatlinchan, Chapingo y San Camilo.

g) Uso de suelo y vegetación

El predio es un rodal cultivado de eucalipto, denominándose de tipo BCe, rodeado por agricultura de temporal (T) (INEGI, 2005). Otras especies arbóreas y arbustivas que es posible encontrar dentro del predio son: *Schinus molle*,

Prosopis juliflora, *Casuarina equisetifolia*, *Cupressus lindleyi*, *Buddleja cordata*, *Eucalyptus globulus*, *Pinus cembroides*, *P. greggii*, *Quercus deserticola*, y dentro de las herbáceas predominan las gramíneas (Ávila, 1963; Martínez, 2008) .

3.2 Identificación de las especies arbóreas y arbustivas

Ávila (1963) especifica que las especies *E. camaldulensis* y *E. resinifera* inicialmente fueron plantadas en el predio, y en investigaciones recientes fueron verificadas por Martínez (2008), Fajardo (2013) y Ruiz (2013). Se utilizó un manual para la identificación de eucaliptos presentes en la zona centro del país ("Eucaliptos que habitan en norte y centro de México: Manual para su determinación") elaborado por Gutiérrez *et al.* (2006).

La especie *O. ficus-indica* fue identificada por Reyes (1972) y Martínez (2008) y verificada con el manual "Las cactáceas de México" elaborado por Bravo-Hollis (1978).

3.3 Estrategia de muestreo

Para la elección de los rodales se consideró que los árboles estuvieran a una distancia de 3 m de acuerdo a las distancias de siembras inicialmente establecidas, así también, que dos rodales tuvieran presencia de *O. Ficus-indica* y uno no, el cual fue considerado como testigo. De esta forma los rodales se clasificaron de la siguiente forma (Cuadro 3).

Cuadro 3. Especies presentes en cada rodal.

Rodal	Especies presentes
1	<i>Opuntia ficus-indica</i> y <i>Eucalyptus camaldulensis</i>
2	<i>Opuntia ficus-indica</i> y <i>Eucalyptus camaldulensis</i>
3	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>

En cada rodal se establecieron tres cuadros de 25 m² cada uno (Figura 5), los cuales a su vez estaban divididos en 4 cuadrantes (Figura 6), en donde los cuadrantes 1 conformaban una muestra compuesta según el tipo de muestra (Cuadro 4, Figura 6) y lo mismo ocurrió para los cuadrantes 2.

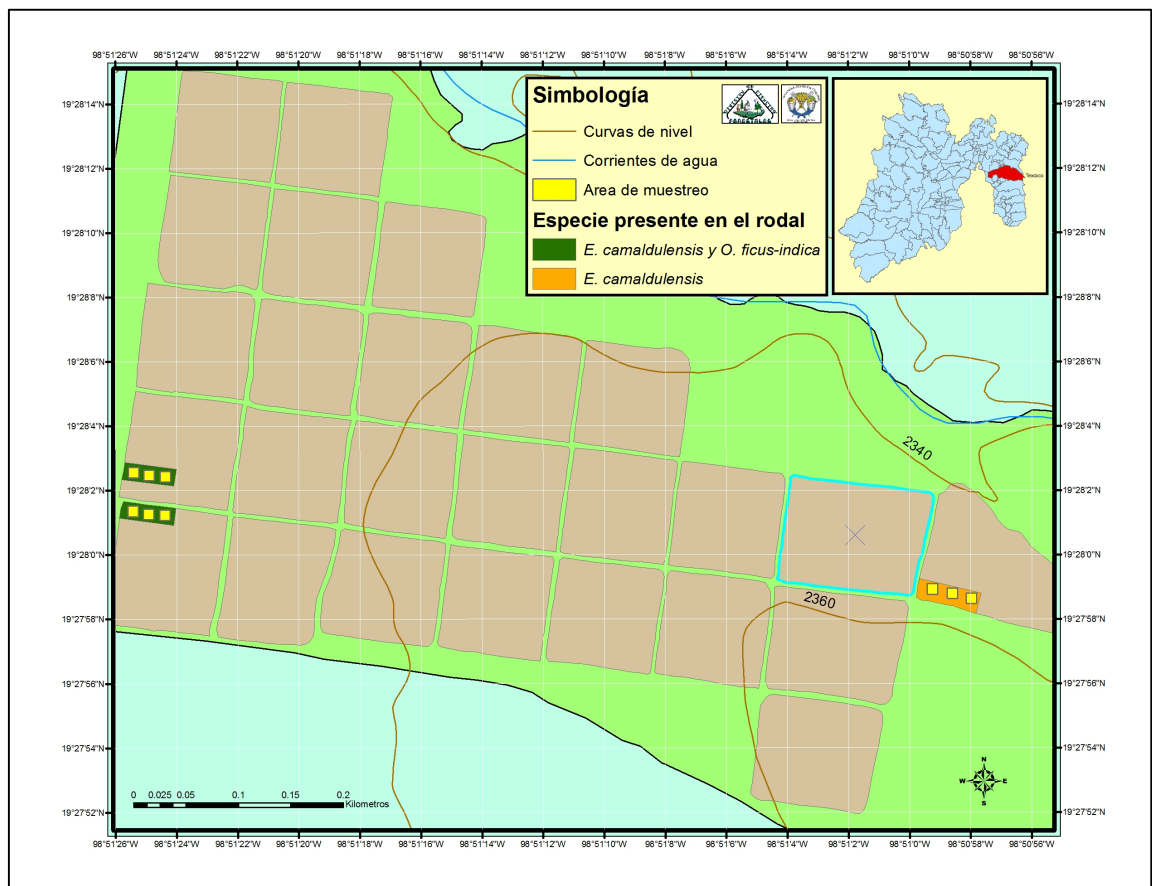


Figura 5. Ubicación de los cuadros muestrales.

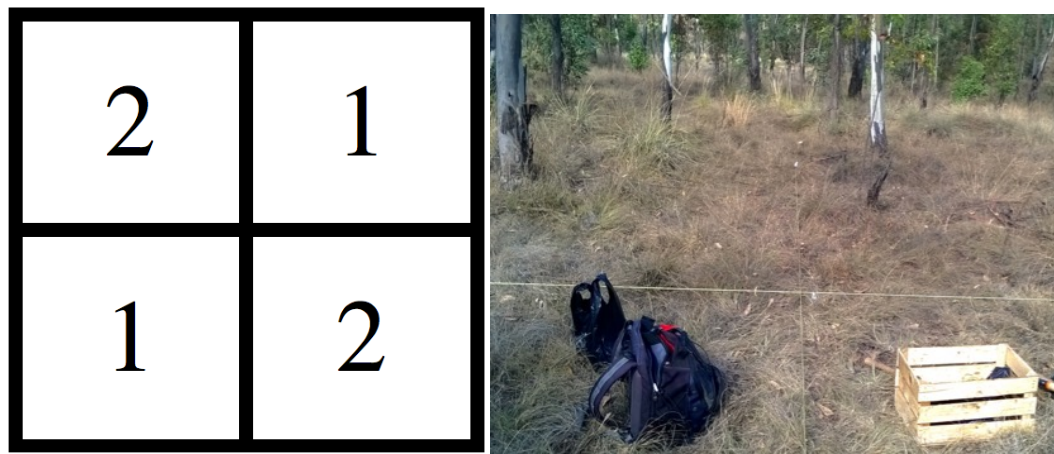


Figura 6. Forma y orden de los cuadros de 25 m².

La ubicación de cada muestra se efectuó como se describe en el Cuadro 4 y Figura 7, para formar la muestra compuesta.

Cuadro 4. Tipo de muestra y descripción.

Tipo de muestra	Descripción
<i>O. ficus-indica</i>	Obtenida a 50 cm de su base, con 20 cm de profundidad.
<i>E. camaldulensis</i>	Obtenida a 50 cm de su base, con 20 cm de profundidad.
Entre especies	Obtenida entre las especies de <i>E. camaldulensis</i> y <i>O. ficus-indica</i> , con 20 cm de profundidad.

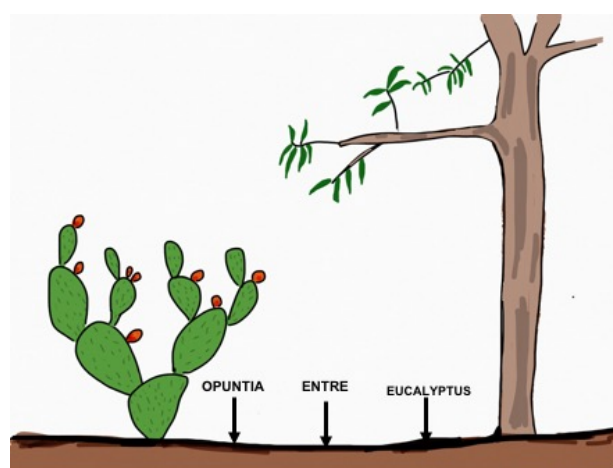


Figura 7. Ubicación de las muestras.

3.4 Estrategia de análisis

3.4.1 Propiedades evaluadas

Por cada muestra compuesta se evaluaron las siguientes propiedades físicas y químicas (Cuadro 5).

Cuadro 5. Análisis realizados en laboratorio.

Análisis químicos	Análisis físicos
Materia orgánica	Estabilidad de agregados (EA)
pH	Densidad aparente
Fósforo	Profundidad del suelo
Potasio	
Nitrógeno total	

3.4.2 Propiedades físicas

Las propiedades físicas de suelos fueron determinadas en el Laboratorio de Pedología y en el de Física de Suelos del Departamento de Suelos de la Universidad Autónoma Chapingo de acuerdo a los estándares de la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2003) y según Sarkar y Haldar, (2005) para la determinación de densidad aparente. A continuación, se enlistan los métodos usados para cada propiedad física estudiada (Cuadro 6).

Cuadro 6. Métodos usados para el análisis de propiedades físicas.

Propiedad	Método	Fuente
Estabilidad de agregados	Método de Yoder (por un solo tamiz)	Cristobal, (2004)
Densidad aparente	Método del cilindro	Sarkar y Haldar (2005)
Profundidad	Barrena metálica de 1 m de longitud	NOM-021-RECNAT-2000

3.4.3 Propiedades químicas

Los análisis de las propiedades químicas de los suelos Se basaron en la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2003) y se llevaron a cabo en el Laboratorio de Química de Suelos del Departamento de Suelos de la Universidad Autónoma Chapingo. A continuación se muestra en el Cuadro 7 el listado de los métodos utilizados.

Cuadro 7. Métodos usados para el análisis de propiedades químicas.

Propiedad	Método	Fuente
Materia Orgánica	Método Walkley y Black	NOM-021-RECNAT-2000
pH	Relación 1:2, con H ₂ O	NOM-021-RECNAT-2000
Fósforo	P extractable, método Olsen	NOM-021-RECNAT-2000
Nitrógeno total	Método semimicro-Kjeldahl (no incluye nitratos)	NOM-021-RECNAT-2000
Potasio intercambiable	Por flamometría	NOM-021-RECNAT-2000

3.4.4 Análisis estadístico

Para comparar las propiedades químicas de suelo entre los ambientes edáficos: suelo cerca de *o. ficus-indica*, suelo cerca de *e. camaldulensis*, y suelo entre las dos especies; se hizo uso de un modelo estadístico para realizar un estudio observacional con tres tratamientos (poblaciones), el cual es:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \epsilon_{ij};$$

$$i = 1, 2, 3$$

$$j = 1, \dots, 6$$

Donde:

μ : Media general

τ_i : Efecto del tratamiento i

ϵ_{ij} : Errores independientes e idénticamente distribuidos $N(0, \sigma^2)$

Se llevó a cabo el análisis de varianza (ANOVA) bajo el modelo anterior para cada una de las variables de respuesta consideradas. Donde la prueba general de F fue significativa ($P\text{-valor} < 0.05$), se procedió a aplicar el procedimiento de comparaciones múltiples de medias de Tukey para comparaciones entre pares de medias.

4. RESULTADOS Y DUSCUSIÓN

4.1 Descripción de los rodales

Una vez que se realizó la verificación de la presencia de especies en la zona de estudio, se llevó a cabo el conteo individual de las especies *E. camaldulensis* y *O. ficus-indica* presentes en cada rodal. Los resultados se muestran en la Figura 8.

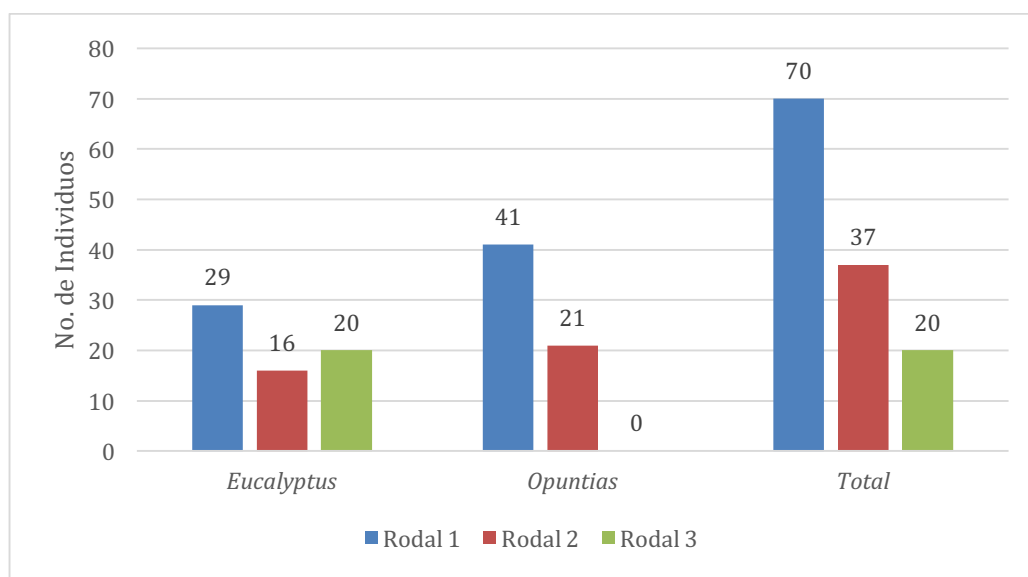


Figura 8. Cantidad de árboles y arbustos por rodal.

El rodal 1 fue el que presentó la mayor cantidad de árboles de *E. camaldulensis* (29) y de *O. ficus-indica* (41), también, fue el que sumó la mayor cantidad de individuos de las dos especies con 70 en total. El rodal 2 tuvo cantidades similares en el número de individuos de *E. camaldulensis* (16) con la especie *O.*

ficus-indica (21), sin embargo, tuvo una menor cantidad en la suma de árboles de *E. camaldulensis* y arbustos de *O. ficus-indica* (37 en total) respecto al rodal 1. Finalmente, en el rodal 3 hubo solo 20 árboles de *E. camaldulensis*, siendo el rodal que presentó la menor cantidad de árboles con respecto a los otros dos.

4.2 Muestreos realizados en los rodales

Para generar las muestras compuestas se tomaron tres submuestras por cada tipo de muestra en cada cuadrante (*E. camaldulensis*, *O. ficus-indica* y Entre especies), por lo que una muestra compuesta estuvo conformada de 6 submuestras, lo cual fue representativo para analizar un área de 25 m², realizando un total de 282 submuestras para los 9 cuadros de 25 m², con observaciones de profundidad y muestreo del suelo para obtener el dato de densidad aparente. Con las submuestras se conformaron 47 muestras compuestas en las cuales se analizaron las propiedades químicas y la estabilidad de agregados (Cuadro 8).

Cuadro 8. Número de submuestras realizadas por rodal.

Submuestra	Rodal 1	Rodal 2	Rodal 3	Total
<i>E. camaldulensis</i>	36	30	36	102
<i>O. ficus-indica</i>	36	36	0	72
Entre especies	36	36	36	108
Total	108	102	72	282

Como se indicó, las 47 muestras compuestas fueron analizadas en laboratorio, se destacó que en el rodal 2, área de muestreo 6, cuadrantes 2 no se

obtuvieron submuestras de *E. camaldulensis* debido a que no se registró la presencia de esta especie en el área de muestreo.

4.3 Comparación entre los tipos de muestras por rodal

4.3.1 Propiedades físicas en los tipos de muestras por rodal.

Este análisis se elaboró para identificar algún efecto en la interacción entre *E. camaldulensis* y *O. ficus-indica*, y en rodales con presencia únicamente de la especie *E. camaldulensis*.

a) Rodal 1

Para las tres propiedades analizadas en el rodal 1 (DAP, EA y profundidad) cuyos valores medios se reportan en el Cuadro 9, en los análisis estadísticos (Tukey, $\alpha < 0.05$) no se encontraron diferencias significativas, $P > 0.1$, entre los diferentes tipos de muestras. Los rangos de valores de las submuestras analizadas para DAP fueron de 1.30 - 1.43 g·cm⁻³ y la variabilidad de los datos fue baja ($CV_{prom} = 2.48$), en los tres rodales se destaca que esta propiedad fue homogénea sobre la superficie muestreada. En el caso de EA los rangos de los valores de las submuestras variaron de 27.04 - 69.04 %, los datos de las submuestras en los tres rodales no fueron tan homogéneos sobre el terreno, presentando un $CV_{prom} = 19.94$. En cuanto a la Profundidad, los rangos de las submuestras fueron de 19 - 32 cm, con una variabilidad de $CV_{prom} = 13.82$, que

indicaron una variación moderada en la profundidad del suelo debido a la presencia del tepetate y suelos someros.

b) Rodal 2

La comparación de medias (Tukey, $\alpha < 0.05$) de las propiedades físicas en este rodal no presentaron diferencias significativas ($P > 0.1$) entre los 3 tipos de muestras en el rodal (Cuadro 9) y los rangos de las muestras analizadas fueron muy variables. La DAP presentó una baja variabilidad con $CV_{prom} = 12.85$ y rango de datos de $1.04 - 1.43 \text{ g}\cdot\text{cm}^3$, se comportaron de manera homogénea sobre el terreno. En EA la variabilidad fue intermedia con $CV_{prom} = 29.56$ y rango de datos de $25.91 - 76.18 \%$ observando variaciones entre las diferentes submuestras y por lo tanto, un suelo heterogéneo para esta propiedad. Finalmente, en la Profundidad se encontró alta variabilidad con $CV_{prom} = 74.76$ y rango de datos de $0.0 - 17.33 \text{ cm}$ observando una gran variación en la profundidad, ya que en este sitio hubo zonas donde el tepetate era inmediato y no había suelo mientras que en otras si lo hubo.

c) Rodal 3

La comparación de medias (Tukey, $\alpha < 0.05$) entre las muestras de *E. camaldulensis* y Entre especies para las propiedades físicas no indicó alguna diferencia significativa, $P > 0.1$ (Cuadro 9). Sin embargo, los rangos en las

medias de las submuestras analizadas para la DAP de 1.04 - 1.33 g·cm³ tuvieron poca variación en los datos ($CV_{prom} = 5.71$), comportándose homogéneamente sobre el terreno. Para EA en donde las submuestras arrojaron valores de 27.04 - 69.04 % el $CV_{prom} = 29.90$ indicó variaciones en la agregación del suelo, presentándose de forma heterogénea. En cuanto a la profundidad, las submuestras variaron de 10 - 32 cm con un $CV_{prom} = 36.51$, indicando distintas profundidades sobre el terreno a pesar de que las submuestras no estaban tan alejadas una de la otra.

Cuadro 9. Comparación entre tipos de muestras de las propiedades físicas por cada rodal.

Rodal	Tipo de muestra	DAP (g·cm ³)	EA (%)	Profundidad (cm)
		Media	Media	Media
Rodal 1	<i>O. ficus-indica</i>	1.361a ± 0.02	63.040a ± 10.21	20.797a ± 3.673
	CV	1.43	16.20	17.66
	<i>E. camaldulensis</i>	1.362a ± 0.04	59.944a ± 15.23	21.878a ± 2.586
	CV	3.31	25.41	11.82
Rodal 2	Entre especies	1.370a ± 0.03	64.223a ± 11.33	21.338a ± 2.430
	CV	2.35	17.64	11.39
	<i>O. ficus-indica</i>	1.205a ± 0.173	52.876a ± 11.500	9.043a ± 6.706
	CV	14.36	21.75	74.16
Rodal 3	<i>E. camaldulensis</i>	1.265a ± 0.153	57.717a ± 14.926	6.888a ± 4.216
	CV	12.07	25.86	61.20
	Entre especies	1.247a ± 0.149	48.674a ± 19.292	7.286a ± 6.137
	CV	11.96	39.63	84.24
Rodal 3	<i>E. camaldulensis</i>	1.263a ± 0.055	50.360a ± 10.265	22.083a ± 8.500
	CV	4.38	20.38	38.49
	Entre especies	1.188a ± 0.082	43.834a ± 17.066	17.000a ± 5.441
	CV	6.90	38.93	32.00

En general, se observó que de acuerdo a las medias resultantes dentro de cada rodal, no hubo alguna diferencia significativa entre los diferentes tipos de muestras, lo que sugiere que las propiedades físicas son homogéneas. Sin embargo, los coeficientes de variación resultantes mostraron que en algunos casos las propiedades, principalmente en EA y Profundidad eran variables y se podía pasar de zonas que no tenían suelo a donde si lo había, y áreas que presentaron agregaciones regulares y malas. La dispersión de los valores de AE en los tres rodales puede deberse a los cambios en el contenido de la MO (Pulido-Moncada *et al.*, 2009). También, se encontró que en el rodal 2 los valores de CV fueron mayores respecto a los otros dos, expresando una heterogeneidad importante en las profundidades del suelo, por lo que puede ser necesario aplicar otro tipo de muestreo que permita homogenizar las muestras a través de la descripción de los distintos tipos de microhábitats (áreas tepetatosas, con suelos de profundidad media, áreas sin vegetación, etc.) que pueden influir sobre las propiedades del suelo (Yunchao *et al.*, 2010).

A pesar de no encontrar diferencias significativas entre las medias de DAP en cada rodal, se pudo observar que el rodal 2 presentó una mayor dispersión en sus datos, lo cual puede deberse a una mayor presencia de material tepetatoso fragmentado, producto del proceso de roturación del suelo para el establecimiento de la plantación. Blanco-Sepúlveda (2009), menciona que las gravas (pedregosidad) presentes en los suelos pueden influir en los resultados de las muestras de la DAP debido al menor contenido de humedad que pueden contener respecto al suelo con textura más fina.

El uso de *Eucalyptus* en procesos de rehabilitaciones de suelos degradados ayuda en el mejoramiento de las propiedades físicas del suelo ya sea en la densidad aparente, agregados estables y a su vez en la profundidad, esto por medio de la agregación de M. O. al suelo (Seenivasan *et al.*, 2015), pero en este caso, no se aprecia una diferencia con la especie *O. ficus-indica*.

4.3.2 Propiedades químicas en los tipos de muestras por rodal

a) Rodal 1

Las propiedades químicas analizadas en este rodal (al igual que las físicas) no presentaron diferencias significativas (Tukey, $\alpha < 0.05$) entre las medias de los tres tipos de muestreos para las cinco propiedades estudiadas (Cuadro 10). El Nt, P, MO y pH obtuvieron $P > 0.1$, mientras que el K mostró diferencia en las medias según el ANOVA ($P < 0.1$), pero al aplicar la prueba de Tukey no hubo diferencia significativa alguna. Los coeficientes de variación resultantes en Nt y pH fueron bajos, comportándose de forma homogénea sobre el suelo sin importar la ubicación de la muestra, los valores de las submuestras para el Nt fueron de 0.059 - 0.080 % y en el pH de 5.7 - 7.8, aunque en este último se observa que a pesar de no haber diferencias significativas entre las medias, el terreno presenta cambios que van de suelos ligeramente ácidos a ligeramente alcalinos. En cuanto la variación de las submuestras de MO (de 1.614 - 3.765 %) y K (de 0.149 - 0.503 me·100g⁻¹) se observó que se comportaron de forma heterogénea sobre el suelo. La MO en el tipo de muestra entre especies fue

más variable respecto a la muestra cercana a *O. ficus-indica* y a *E. camaldulensis*, debido a que el aporte de biomasa es mayor al estar cercano a la especie, mientras que al alejarse de ésta, los aportes pueden ser menores. También, en el caso del K las variaciones de las submuestras entre especies fueron mayores que en las submuestras cercanas a cada especie. Para el caso del P, mostró mayor variabilidad en sus datos (1.124 - 9.937 ppm) indicada por el $CV_{prom} = 51.99$, en donde las submuestras entre especies fueron más heterogéneas en el terreno en comparación con las que se encontraron cercanas a *O. ficus-indica*.

b) Rodal 2.

Las propiedades químicas (al igual que en el rodal 1) no mostraron diferencias estadísticas significativas (Cuadro 10) al momento de comparar sus medias (Tukey, $\alpha < 0.05$). Los rangos de las submuestras analizadas para Nt fueron de 0.059 - 0.090 %, encontrándose de forma homogénea en el suelo, ya que presentó baja variación en sus datos con un $CV_{prom} = 10.98$. Para la propiedad de pH las medias de este rodal indicaron que los suelos son casi neutros, mientras que sus submuestras fueron de 6.05 - 7.71 con un $CV_{prom} = 6.73$, lo que indicó bajas variaciones en sus datos, sin embargo, a pesar de esta poca variabilidad, químicamente es posible encontrar zonas que son ligeramente ácidas y ligeramente alcalinas. En el caso del P los valores de sus submuestras fueron de 3.106 – 17.391 ppm con un $CV_{prom} = 47.82$, mostrando una

distribución del elemento muy heterogénea en el suelo, además de que los valores encontrados en las muestras cercanas a la especie *O. ficus-indica* y entre especies variaron más en comparación con la cercana a *E. camaldulensis*. Resultados similares se encontraron para la MO con valores en sus submuestras que fueron de 2.689 - 11.565 % y un $CV_{prom} = 52.11$, el cual indica que su distribución en el suelo también es muy heterogénea, igualmente, las submuestras cercanas a *O. ficus-indica* y entre especies eran más variables que las cercanas a *E. camaldulensis*. Para el caso del K los valores de sus submuestras fueron de 0.122 - 0.992 me·100g⁻¹ presentando también una alta variación en sus datos con un $CV_{prom} = 63.48$.

c) Rodal 3.

Para este rodal, el Nt si indicó diferencias significativas al realizar la comparación estadística de las medias (Tukey, $\alpha < 0.05$), en donde el tipo de muestra con menor presencia de este elemento fue la que se encontró cercana a la especie *E. camaldulensis* con $0.059b \pm 0.000$ %, mientras que el tipo de muestra que tuvo la mayor cantidad fue entre especies con $0.069a \pm 0.007$ % (Cuadro 10), así, los CV que se presentaron en cada tipo de muestra fueron bajos por lo que sus submuestras fueron similares. Para el pH no se encontraron diferencias en sus medias y estas indicaron que los suelos son ácidos, observando también que los rangos de sus submuestras (5.24 - 6.44) presentaron esta misma tendencia, además de tener presencia homogénea

sobre el terreno ($CV_{prom} = 6.51$). En los casos del P (con variación en sus datos de 1.242 - 11.180 ppm), del K (con variación de 0.286-0.894 me·100g⁻¹), y de MO (con variación de 1.613 - 5.110 %), sus muestras de tipo entre especies tuvieron una mayor variabilidad que las ubicadas cercanas a *E. camaldulensis*.

Cuadro 10. Comparación entre tipos de muestras de las propiedades químicas por cada rodal.

Rodal	Tipo de muestra	Nt% Media	P (ppm) Media	K (me·100g ⁻¹) Media	MO (%) Media	pH Media
	<i>O. ficus-indica</i>	0.068a±0.007	5.176a±1.398	0.332a±0.084	2.510a±0.431	7.422a±0.349
	CV	10.59	27.01	25.33	17.16	4.70
Rodal 1	<i>E. camaldulensis</i>	0.065a±0.003	5.026a±2.707	0.200a±0.046	2.824a±0.680	6.767a±0.613
	CV	4.07	53.85	23.22	24.09	9.05
	Entre especies	0.064a±0.004	4.865a±3.343	0.300a±0.130	2.174a±0.667	7.103a±0.795
	CV	6.14	68.71	43.12	30.66	11.19
	<i>O. ficus-indica</i>	0.062a±0.002	8.903a±4.243	0.489a±0.338	5.670a±3.349	7.297a±0.381
	CV	2.59	47.66	69.16	59.06	5.22
Rodal 2	<i>E. camaldulensis</i>	0.062a±0.003	5.466a±1.608	0.372a±0.229	4.680a±1.656	7.252a±0.466
	CV	4.34	29.41	61.53	35.40	6.43
			10.710a±			
	Entre especies	0.068a±0.011	5.150	0.358a±0.178	4.326a±2.209	7.180a±0.590
	CV	16.77	48.08	49.86	51.06	8.21
	<i>E. camaldulensis</i>	0.059b±0.000	7.790a±2.661	0.586a±0.191	2.129a±0.101	5.835a±0.441
	CV	0.00	34.16	32.51	4.75	7.56
Rodal 3	Entre especies	0.069a±0.007	4.462a±2.773	0.578a±0.234	3.003a±1.223	5.937a±0.315
	CV	10.59	62.14	40.56	40.71	5.31

En general, se apreció que los suelos son homogéneos en sus propiedades químicas en cada rodal y que no hubo diferencias estadísticas entre los tipos de muestras, salvo la del Nt en el rodal 3, lo cual puede explicarse debido a la ausencia de la especie *O. ficus-indica* en esta zona, ya que el tipo de muestra entre especies fue la que presentó la mayor cantidad de Nt y al no haber una especie que demande de este nutriente se pudo mantener almacenado en el

suelo. La *O. ficus-indica* es una especie que tiene una demanda nutrimental sobre esta propiedad (Nobel *et al.*, 1987) y de esta forma puede verse disminuido este elemento en el suelo. Eldridge y Wong (2005) reportaron un gradiente para el Nt en donde esta propiedad es más alta cuando se encuentra más cercana al tronco (ya sea en arboles agrupados, aislados y muertos) y disminuye al alejarse, lo que resultó fue contrario a lo ocurrido en el presente estudio, ya que originalmente los árboles fueron sembrados a tres metros de distancia, en los rodales 1 y 2, estos espacios de crecimiento han sido ocupados por la *O. ficus-indica* con lo cual se han disminuido las áreas sin vegetación arbustiva entre los árboles, mientras que en el rodal 3 aún se presentan espacios libres de *O. ficus-indica*.

De acuerdo a Zuo *et al.* (2009), mientras existan mayores cantidades de pequeños parches sin vegetación, las cantidades de Nt y MO serán más heterogéneas respecto a las áreas que tengan menores parches sin vegetación, lo cual se ve reflejado en los resultados de las muestras analizadas del rodal 3, donde las muestras cercanas a *E. camaldulensis* tuvieron menores cantidades de Nt respecto a las muestras de tipo entre especies. A pesar de que en la base del árbol se encontraron menores cantidades de Nt en el suelo, la utilización de *E. camaldulensis* en otras rehabilitaciones ha sido capaz de aumentar los niveles de esta propiedad, como también del fósforo disponible y del potasio (Seenivasan *et al.*, 2015). También, este árbol tiene una demanda nutrimental (de acuerdo al siguiente orden) de N, P, K, y Mg los cuales son retenidos principalmente en sus hojas y tallos portando estos mismos elementos en forma de hojarasca al suelo (Harmand *et al.*, 2004) y que al ser mineralizados son

liberados influyendo de manera importante en las aportaciones de MO como en el fósforo disponible, presentando valores que pueden ser comparados con especies fijadoras de nitrógeno como lo son *Acacia farnesiana* y *Acacia salicina*, información encontrada en evaluaciones similares para suelos deteriorados de acuerdo a Sayad *et al.* (2010).

Los diferentes niveles de acidez y alcalinidad en el suelo que se presentaron en los rodales pueden influir en la disponibilidad de nutrientes, ya que en condiciones acidas se ve reducida la disponibilidad de Ca, Mg, Mo y P, e incrementa para Fe, Mn, B y Zn, también, el N es más disponible entre los rangos pH de 6.0 y 7.0 (Jones, 2003). Lo cual influirá en las especies que se establezcan durante la rehabilitación de acuerdo a sus necesidades nutrimentales y al pH que toleren.

4.4 Comparación entre los rodales por tipo de muestra

4.4.1 Propiedades físicas de los rodales según tipo de muestra

a) Tipo de muestras "*E. camaldulensis*"

La comparación de medias (Tukey, $\alpha < 0.05$) para la DAP no indicaron diferencias significativas ($P < 0.1$) entre los rodales, los bajos valores de CV mostraron que las muestras cercanas al árbol son similares y sus datos analizados variaron de 1.06 - 1.43 g·cm³ con un CV_{prom} = 7.09. En cuanto a la EA el análisis de medias (Tukey, $\alpha < 0.05$) tampoco indicó diferencias

significativas ($P < 0.1$), expresando variación en los datos de $CV_{prom} = 24.27$, y con submuestras que oscilaron de 38.605 - 78.671 %.

Para el caso de la profundidad, si hubo diferencias significativas altas entre las medias de los rodales ($P < 0.001$) al realizar el análisis estadístico (Tukey, $\alpha < 0.05$), adquiriendo un $CV_{prom} = 33.49$ con una variación moderada en las submuestras analizadas que van de 0 - 32 cm. El rodal 2 fue el que presentó la media más baja con 6.888 ± 4.216 cm, y el mayor CV = 61.20 (Cuadro 11), lo que indica una gran variabilidad en sus submuestras analizadas, ya que los rangos registrados en este rodal fueron de 0 - 10.5 cm; se observó que en las zonas sin suelo hubo presencia directa del tepetate. Por otro lado, los rodales 1 y 3 fueron los que tuvieron mayores profundidades y menores coeficientes de variación (respecto al rodal 2), sin embargo, las profundidades cercanas al árbol en el rodal 3 variaron más, CV = 38.49, que las encontradas en el rodal 1, CV = 11.82, que fueron más homogéneas (Cuadro 11). Los bajos valores en las profundidades pueden indicar que el suelo original era somero y ha tenido poco desarrollo, ya que el *Eucalyptus* es un árbol perennifolio y los aportes de biomasa, a través de su hojarasca y corteza desprendida, no han sido suficientes para incrementar su espesor. La limitación por parte del tepetate, también ha impedido una adecuada lixiviación que permita la descomposición de hojarasca u otros materiales (Miranda Neto *et al.*, 2014). Aunque, en los horizontes más profundos, la presencia de este árbol influye en procesos de rehabilitación internos del suelo a través de sus raíces (con la exudación de

metabolitos) contribuyendo en la circulación de agua, nutrientes y creación de canales para aireación y circulación de materiales (Osman, 2013b).

b) Tipo de muestras "*O. ficus-indica*"

Para la DAP se presentaron diferencias débiles ($P < 0.1$) al realizar el ANOVA, sin embargo, al aplicar Tukey ($\alpha < 0.05$) no se identificó alguna diferencia. El $CV_{prom} = 9.60$ y el rango de los datos analizados variaron de $1.02 - 1.43 \text{ g}\cdot\text{cm}^3$ indicando que las submuestras ubicadas cerca de la especie *O. ficus-indica* se comportaron de manera similar en los dos rodales. Para la propiedad EA tampoco se identificaron diferencias significativas entre las medias de los rodales (Tukey, $\alpha < 0.05$), presentando un $CV_{prom} = 18.76$ e indicando que esta propiedad presenta variaciones moderadas en sus submuestras con rangos que van de $39.70 - 77.25 \%$.

En el análisis de la profundidad se encontraron diferencias significativas (Tukey, $\alpha < 0.05$) con $P < 0.01$. El rodal 1 fue el que registró la media con mayor profundidad $20.797 \pm 3.673 \text{ cm}$, un $CV = 17.663$ (Cuadro 11), y los valores de profundidad de las submuestras variaron de $14.80 - 25.25 \text{ cm}$. Mientras tanto, el rodal 2 fue el que tuvo la menor profundidad con una media y desviación estándar de $9.043 \pm 6.706 \text{ cm}$ además de un $CV = 74.159$ (Cuadro 11) que representa una gran variabilidad e indica que la profundidad del terreno es muy heterogénea, lo cual se refleja en el rango de valores registrados que van de $1.0 - 25.25 \text{ cm}$. De acuerdo a Nobel (2002), la *O. ficus-indica* no tiene

problemas con la profundidad del suelo ya que sus raíces tienden a extenderse y desarrollarse superficialmente con una profundidad media de 15 cm, lo cual permite una rápida absorción del agua de lluvia u otras fuentes como la humedad del viento, de esta manera, la pérdida de agua hacia la atmósfera de la *O. ficus-indica* por medio de la transpiración es muy baja.

Aunque no está registrada la inclusión de *O. ficus-indica* en el área, esta ha tenido un buen desarrollo pues sigue colonizando el lugar. Este éxito debió influir en el cambio de algunas propiedades físicas y en las mejorías de algunas condiciones microambientales (Neffar *et al.*, 2013) por medio del enraizamiento de los cladidos dispersados en el suelo, además de que es una especie que ante cierto estrés hídrico el desarrollo de sus raíces es mayor (Snyman, 2006). En erosiones causadas por escorrentías las especies de clima seco, como lo es la *Opuntia*, pueden ayudar a disminuirla debido a su amplia estructura aérea (cónica) ya que puede interceptar cantidades significativas de lluvia, incrementando la infiltración, disminuyendo el potencial erosivo por escorrentía (Puigdefábregas, 2005) y en combinación con otras especies pueden mejorar la estabilidad de los agregados así como la densidad aparente (Vásquez-Méndez *et al.*, 2010).

c) Tipo de muestras "Entre rodales"

La comparación de medias (Tukey, $\alpha < 0.05$) para DAP mostró que los rodales 1 y 2 se comportaron de forma similar, así como el 2 y 3. Sin embargo, los

rodal 1 y 3 si presentaron diferencias significativas, aunque estas fueron débiles ($P < 0.1$). Así, el rodal 1 fue el que tuvo los niveles más altos con una media y desviación estándar de $1.370 \pm 0.032 \text{ g}\cdot\text{cm}^3$ y $CV = 2.348$, mientras que el rodal 3 presentó la menor media con $1.188 \pm 0.082 \text{ g}\cdot\text{cm}^3$ y un $CV = 6.901$ (Cuadro 11). El rango en los valores de las submuestras presentes en los tres rodales fue de $1.04 - 1.47 \text{ g}\cdot\text{cm}^3$, sus CV resultantes muestran que los datos de esta propiedad ubicadas entre las especies en los tres rodales se presentan de manera homogénea en el suelo.

En el análisis de las medias (Tukey, $\alpha < 0.05$) para EA no existieron diferencias significativas ($P > 0.1$), encontrando una mayor variabilidad en las submuestras analizadas para los rodales 2 ($CV = 39.635$) y 3 ($CV = 38.933$) respecto a las submuestras del rodal 1 ($CV = 17.639$), el cual manifestó una variabilidad menor (Cuadro 11). Las submuestras analizadas para esta propiedad fueron de $25.91 - 74.75 \%$.

Respecto a la profundidad, se encontraron diferencias significativas altas ($P < 0.01$) y de acuerdo a los análisis estadísticos (Tukey, $\alpha < 0.05$) se observa que el rodal 1 con media y desviación estándar de $21.338 \pm 2.430 \text{ cm}$, así como el 3 con $17.000 \pm 5.441 \text{ cm}$ y para ambos rodales con submuestras de $10 - 24.88 \text{ cm}$, presentaron mayores profundidades y CV bajos, indicando que las profundidades del suelo fueron más homogéneas en comparación a las encontradas en el rodal 2, el cual presentó la profundidad más baja con una media de $7.286 \pm 6.137 \text{ cm}$ y un $CV = 84.238$ (Cuadro 11) que reflejo la

ausencia de suelo en algunas zonas ubicadas entre las especies, indicando una oscilación de sus submuestras de 0.0 - 13.67 cm.

Cuadro 11. Comparación entre rodales de las propiedades físicas por cada tipo de muestra.

Tipo de muestra	Rodal	DAP (g·cm ³) Media	EA (%) Media	Profundidad (cm) Media
<i>E. camaldulensis</i>	Rodal 1	1.362±0.045	59.944a±15.230	21.878a±2.586
	CV	3.31	25.41	11.82
	Rodal 2	1.265a±0.153	57.717a±14.926	6.888b±4.216
	CV	12.07	25.86	61.20
	Rodal 3	1.263a±0.055	50.360a±10.265	22.083a±8.500
	CV	4.38	20.38	38.49
<i>O. ficus-indica</i>	Rodal 1	1.361a±0.019	63.040a±10.210	20.797a±3.673
	CV	1.427	16.197	17.663
	Rodal 2	1.205a±0.173	52.876a±11.500	9.043b±6.706
	CV	14.357	21.750	74.159
Entre especies	Rodal 1	1.370a±0.032	64.223a±11.329	21.338a±2.430
	CV	2.348	17.639	11.391
	Rodal 2	1.247ba±0.149	48.674a±19.292	7.286b±6.137
	CV	11.963	39.635	84.238
	Rodal 3	1.188b±0.082	43.834a±17.066	17.000a±5.441
	CV	6.901	38.933	32.003

4.4.2 Propiedades químicas entre los rodales según tipo de muestra

a) Tipo de muestras "*E. camaldulensis*"

En las propiedades químicas evaluadas para el caso del *E. camaldulensis*, existieron diferencias significativas entre los rodales con excepción del P, el cual no mostró diferencias significativas en los tres rodales.

Para el caso del Nt, al realizar la comparación de medias (Tukey, $\alpha < 0.05$) se encontraron diferencias significativas altas ($P < 0.01$) entre los rodales 1 y 3, en donde el primero presentó la mayor media con $0.065 \pm 0.003 \%$ y un bajo CV = 4.07, mientras que el rodal 3 tuvo la menor media con $0.059 \pm 0.000 \%$ y un CV = 0.0, observando que en ambos casos se presenta una baja variabilidad en sus submuestras (Cuadro 12) y por lo tanto, esta propiedad se encuentra de manera homogénea al estar ubicada cercana al *E. camaldulensis*. Los rangos de las submuestras analizadas fueron de 0.059 - 0.069 % con un $CV_{prom} = 3.44$. El N, P y K son los principales elementos que se acumulan en las hojas de los árboles (Harmand *et al.*, 2004; Osman, 2013b) y a su vez estos elementos son devueltos al suelo a través de la hojarasca (Yang *et al.*, 2005).

El análisis de comparación de medias (Tukey, $\alpha < 0.05$) para el K presentó resultados similares al nitrógeno. Las medias de los rodales 1 y 2 fueron similares en el contenido de este elemento así como las del 2 y 3. Sin embargo, entre los rodales 1 y 3 si se encontraron diferencias significativas altas ($P < 0.01$), donde las cantidades de K más bajas estuvieron presentes en el rodal 1 (con presencia de *O. ficus-indica*) teniendo una media y desviación estándar de $0.200 \pm 0.046 \text{ me} \cdot 100\text{g}^{-1}$, mientras que el rodal 3 (que no presento *O. ficus-indica*) tuvo una cantidad en su media significativamente mayor $0.586 \pm 0.191 \text{ me} \cdot 100\text{g}^{-1}$, destacando que ambos rodales mostraron un CV similar ($CV_{rodal1} = 23.22$, $CV_{rodal3} = 32.51$) en comparación con el rodal 2, $CV_{rodal2} = 61.53$, en el cual, las cantidades de esta propiedad fueron más variables (Cuadro 12) y por lo tanto, la presencia del K cercano al *E. camaldulensis* fue muy heterogénea en

comparación con los otros rodales. Los valores de las medias utilizados para el análisis van de 0.149 - 0.838 me·100g⁻¹, con un CV_{prom} = 43.79. De acuerdo a Chirinos (2007), si el K (catión monovalente) se encuentra en el suelo en altas concentraciones y compite con cationes divalentes (con más fuerza de atracción electrostática) como el Ca y Mg, este puede influir en los agregados de tal forma que los debilita y los hace más vulnerables al agua, lo cual, puede explicar el por qué el rodal 3 tuvo el menor valor de AE, pues este presentó la mayor cantidad de K.

En el análisis de medias (Tukey, $\alpha < 0.05$) para la MO se identificaron diferencias significativas altas ($P < 0.01$), en donde el rodal 1 con media y desviación estándar 2.824 ± 0.680 % y el rodal 3 con 2.129 ± 0.101 % mostraron bajos valores en sus medias, mientras que el rodal 2, manifestó la mayor media y desviación estándar con 4.680 ± 1.656 %, lo cual puede estar relacionado a la profundidad del suelo. Estas acumulaciones de MO cercanas al tronco de los *Eucalyptus sp.* pueden ayudar en el incremento del contenido de Ca⁺² y Mg²⁺ en el suelo (Eldridge y Wong, 2005), además de poder mejorar algunas propiedades físicas debido a la presencia de los pastos cercanos que se desarrollan (Betancourt *et al.*, 1999) o por la acumulación del mismo follaje del árbol. Los CV que resultaron entre el CV_{rodal1} = 24.09 y CV_{rodal2} = 35.39 fueron mucho mayores que los resultantes en el CV_{rodal3} = 4.75, indicando que las submuestras de los primeros dos rodales variaron más que las del rodal 3, que presenta las submuestras más homogéneas (Cuadro 12). Los valores de las medias analizadas van de 2.02 - 7.26 % presentando un CV_{prom} = 31.24.

Para el pH al realizar la comparación de medias (Tukey, $\alpha < 0.05$) se identificaron diferencias estadísticamente significativas altas ($P < 0.01$), donde los rodales 1 con media y desviación estándar de 6.767 ± 0.613 , y 2 con $7.252a \pm 0.466$ presentaron las medias más altas indicando suelos casi neutros (Cuadro 12). El rodal 3 fue diferente a los otros, indicando una media y desviación estándar baja con $5.835b \pm 0.441$, además de indicar que estos suelos presentan niveles de acidez (Cuadro 12). Las medias analizadas variaron de 5.24 - 7.53 con un $CV_{prom} = 7.83$, que puede ser bajo, aunque, para el caso del pH no se puede afirmar que las medias son homogéneas ya que estrictamente hay valores presentes en los rodales que indican ligera acidez ($pH_{rodal\ 1} = 6.767$ y $pH_{rodal\ 3} = 5.835$) y ligera alcalinidad ($pH_{rodal\ 2} = 7.252$). Se observa que los rodales que presentaron mayor pH (rodal 1 y rodal 2) presentaron mayores cantidades de MO y contaban con la presencia de *O. ficus-indica*, y a su vez, el rodal que presentó valores menores de pH fue el que no contó con la presencia de ésta.

b) Tipo de muestras "*O. ficus-indica*"

Respecto a las propiedades químicas analizadas, se observó que solo en la MO hubo valores estadísticamente diferentes (Tukey, $\alpha < 0.05$), sin embargo, estas diferencias fueron moderadas ($P < 0.05$). El rodal 2 fue el que contó con una mayor media y desviación estándar de 5.670 ± 3.349 % además de un $CV = 59.06$ (Cuadro 12), que indicó una alta variabilidad de esta propiedad sobre el

suelo, así también, sus submuestras variaron de 2.68 - 11.56 %, mientras que para el rodal 1, se tuvo menor media con 2.510 ± 0.431 %, con una variabilidad menor, $CV = 17.16$ (Cuadro 12), en comparación a la del rodal 2, y el total de las submuestras analizadas variaron de 2.02 - 3.23 %. Se observó también que la mayor acumulación de MO registrada en el rodal 2 puede relacionarse a la poca profundidad del suelo, ya que durante los procesos de descomposición, la MO se queda en la superficie, debido a que no hay un lavado como consecuencia del afloramiento de la capa dura del tepetate y al balance hídrico que es deficitario en al menos ocho meses del año. Los mayores niveles de MO pueden ser debido a que la *Opuntia* es una especie que facilita el desarrollo y colonización de otras herbáceas, aminorando condiciones adversas que pueden estar presentes en el suelo (Neffar *et al.*, 2013).

El Nt presentó diferencias significativas bajas ($P < 0.1$), pero al aplicar Tukey ($\alpha < 0.05$) no se observaron diferencias significativas entre las medias, se observa que los dos rodales presentaron baja variabilidad en sus submuestras analizadas ($CV_{prom} = 8.05$) indicando que los valores de esta propiedad fueron homogéneos al estar cercanos a *O. ficus-indica*, el rango de sus submuestras analizadas fueron de 0.060 - 0.080 %.

En el P al igual que en la anterior propiedad al aplicar el ANOVA se presentaron bajas diferencias significativas ($P < 0.1$) en la comparación de medias, pero al aplicar Tukey ($\alpha < 0.05$) se comprobó que no eran significativas. La variabilidad que presentaron las submuestras cercanas a la *O. ficus-indica* fue heterogénea ($CV_{prom} = 44.87$) y sus valores fueron de 3.10 - 13.66 ppm. Las medias de P que

se encontraron en ambos rodales (Cuadro 12) fueron menores a las recomendadas por Wessels (1988, citado por Snyman *et al.* 2007), que van de 12 - 15 ppm, para que la *O. ficus-indica* pueda desarrollarse adecuadamente, sin embargo, a pesar de que estas cantidades no están inmediatamente disponibles, las encontradas en el área han sido suficientes para que esta se desarrolle y tenga la capacidad de propagarse con el paso de los años. Neffar *et al.* (2013) han reportado que plantaciones de *O. ficus-indica* no tienen efectos significativos en las propiedades de Nt, P y MO con el paso de los años (5 o 25 años), y aunque en la zona de estudio exista esta especie ya adulta y no tengan influencia alguna sobre las propiedades químicas, los nuevos rebrotes que continúan colonizando el lugar tendrán la capacidad de influir sobre el suelo con el transcurso del tiempo.

Para el K no existieron diferencias significativas al comparar las medias (Tukey, $\alpha < 0.05$), registrando para el rodal 1 un CV = 25.33 y para el rodal 2 una mayor variabilidad en los valores de sus submuestras con un CV = 69.16 (Cuadro 12), mientras que los datos de los dos rodales se encontraron en el rango de 0.122 - 0.992 me·100 g⁻¹. El nivel óptimo de K en el suelo recomendado para el desarrollo de *O. ficus-indica* es de 0.384 me·100g⁻¹ (Wessels, 1988, citado por Snyman *et al.* 2007), cantidad que fue encontrada en mayor proporción en el rodal 2, la cual puede ayudar en la nutrición de la especie a pesar de las pocas profundidades encontradas en este sitio. Para el rodal 1, se encontró una menor cantidad del elemento a la recomendada, sin embargo, esta puede ser suficiente para su desarrollo.

Finalmente, en el análisis del pH tampoco se presentaron diferencias significativas (Tukey, $\alpha < 0.05$), las medias indicaron ligera alcalinidad, rodal 1 = 7.422 y rodal 2 = 7.297 (Cuadro 12), pero a pesar de la baja variabilidad en sus submuestras ($CV_{\text{rodal 1}} = 4.70$ y $CV_{\text{rodal 2}} = 5.22$), es posible encontrar zonas con diferentes valores de pH, encontrando un terreno con características heterogéneas en cuanto a esta propiedad se refiere.

Los resultados de las propiedades químicas de las muestras cercanas a la *O. ficus-indica* pueden considerarse bajos, sin embargo, esta especie se ha desarrollado y adaptado con el tiempo debido a los bajos requerimientos nutrimentales que necesita para su establecimiento. Aunque puede tener mayores necesidades nutrimentales, los encontrados en el predio son suficientes para que cumpla con el objetivo de rehabilitar o frenar procesos degradantes de los suelos. Nobel *et al.* (1987) reportaron valores en las propiedades del suelo para antes del establecimiento de *O. ficus-indica* con fines de producción agrícola, de $Nt = 0.175 \%$, $P = 64 \text{ ppm}$, $K = 0.856 \text{ me} \cdot 100g^{-1}$, y $pH = 8.3$, y encontraron que al fertilizar principalmente con N y P un aumento de la cantidad de número de cladiodos por planta, lo cual muestra que estos elementos pueden ser los más demandados por la planta, además, puede ser un indicador visual en campo que ayude a ver la adaptabilidad de la planta así como la presencia de estos elementos sobre el terreno a través de su vigorosidad. Sin embargo, se debe considerar que la disponibilidad de los nutrientes en el suelo pueden variar y el desarrollo de la planta responderá a estos (Nobel, 1989).

c) Tipo de muestras "Entre rodales"

Al realizar el análisis de medias (Tukey, $\alpha < 0.05$) para el P, se encontraron diferencias estadísticas moderadas ($P < 0.05$). Identificando que el rodal 2 tuvo el mayor contenido de este elemento con una media y desviación estándar de 10.710 ± 5.150 ppm (Cuadro 12) y sus valores analizados tuvieron una amplia variación oscilando de 5.59 - 17.39 ppm, con un CV = 48.081 (Cuadro 12). Por el contrario, las medias más bajas se registraron en el rodal 1 con una media y desviación estándar de 4.865 ± 3.343 ppm y en el rodal 3 con 4.462 ± 2.773 ppm, en ambos casos la variabilidad de esta propiedad química sobre el terreno fue muy alta teniendo un CV > 60 (Cuadro 12).

El análisis estadístico del pH (Tukey, $\alpha < 0.05$) indicó la existencia de diferencias estadísticas altas en sus medias ($P < 0.01$), el rodal 1 con 7.103 ± 0.795 y el 2 con $7.180a \pm 0.590$ (Cuadro 12), mostraron valores altos y similares en sus medias además de indicar que los suelos presentaron un pH neutro. La media de menor valor indicada por Tukey ($\alpha < 0.05$) la tuvo el rodal 3 con 5.937 ± 0.315 , valor que es considerado como ligeramente ácido (Cuadro 12). Esta ligera acidez puede deberse a que no hay otra especie que cierre el dosel, y por lo tanto, el gradiente de acidez aumente conforme más se aleje del árbol (Eldridge y Wong, 2005). Mishra *et al.* (2003) han reportado para una plantación que contenía *Eucalyptus tereticornis*, que la disminución de los niveles de pH también suele deberse a la exudación de las raíces y/o a la descomposición de residuos de hojarasca. En los tres casos estudiados la variabilidad de la

propiedad fue muy baja con un $CV_{prom} = 8.89$ y los valores estudiados fluctuaron de entre 5.58 - 7.76.

En la propiedad Nt, el análisis de medias (Tukey, $\alpha < 0.05$) no tuvo diferencias estadísticas ($P > 0.1$), la variabilidad de los datos presentes en los rodales fue baja con un $CV_{prom} = 12.15$ y el total de los valores analizados en los tres rodales variaron de 0.059 - 0.090 %.

Para el K se encontraron diferencias ($P < 0.05$) en el ANOVA, sin embargo, al aplicar la prueba de Tukey ($\alpha < 0.05$) los resultados no mostraron diferencia significativa entre los valores de las medias comparadas. La presencia de este elemento ubicado entre las especies para los tres rodales fue muy variable teniendo un $CV_{prom} = 45.09$, y los datos de sus submuestras analizadas fueron de 0.159 - 0.894 me·100g⁻¹.

Para el caso de MO, al realizar el ANOVA se encontraron diferencias bajas entre las medias ($P < 0.1$) pero al aplicar la prueba de Tukey ($\alpha < 0.05$) no resultaron significativas. La variación de las submuestras analizadas fue diferente en los tres rodales. El rodal 1 presentando un $CV = 30.66$ (con datos que oscilaban entre 1.613 - 3.496 %) y el rodal 3 con $CV = 40.71$ (con oscilación en sus datos de 1.613 - 5.109 %) tuvieron variaciones altas en sus valores, mientras que en el rodal 2 con $CV = 51.06$ (con oscilación de datos entre 2.824 - 8.704) la variación fue mucho mayor (Cuadro 12). Se destaca el hecho de que en este tipo de muestreo no se observó alguna relación entre la profundidad y la materia orgánica, la cual sí estuvo presente en los tipos de muestra de *E. camaldulensis* y *O. ficus-indica*, lo que puede deberse a la

distancia de la ubicación del muestreo, observando que hay menor acumulación de biomasa al alejarse de la base del árbol o del arbusto.

Cuadro 12. Comparación entre rodales de las propiedades químicas por cada tipo de muestra.

Tipo de Muestra	Rodal	Nt % Media	P (ppm) Media	K (me·100g ⁻¹) Media	MO (%) Media	pH Media
<i>E. camaldulensis</i>	Rodal 1	0.065a ± 0.003	5.026a ± 2.707	0.200b ± 0.046	2.824b ± 0.680	6.767a ± 0.613
	CV	4.07	53.85	23.22	24.09	9.05
		0.062ab ±		0.372ba ±		
	Rodal 2	0.003	5.466a ± 1.608	0.229	4.680a ± 1.656	7.252a ± 0.466
	CV	4.34	29.41	61.53	35.39	6.43
	Rodal 3	0.059b ± 0.000	7.790a ± 2.661	0.586a ± 0.191	2.129b ± 0.101	5.835b ± 0.441
<i>O. ficus-indica</i>	CV	0.00	34.16	32.51	4.75	7.56
	Rodal 1	0.068a ± 0.007	5.176a ± 1.398	0.332a ± 0.084	2.510b ± 0.431	7.422a ± 0.349
	CV	10.60	27.01	25.33	17.16	4.70
	Rodal 2	0.062a ± 0.002	8.903a ± 4.243	0.489a ± 0.338	5.670a ± 3.349	7.297a ± 0.381
	CV	2.59	47.66	69.16	59.06	5.22
	Rodal 1	0.064a ± 0.004	4.865b ± 3.343	0.300a ± 0.130	2.174a ± 0.667	7.103a ± 0.795
Entre especies	CV	6.141	68.707	43.12	30.659	11.188
			10.710a ±			
	Rodal 2	0.068a ± 0.011	5.150	0.358a ± 0.178	4.326a ± 2.209	7.180a ± 0.590
	CV	16.767	48.081	49.86	51.061	8.212
	Rodal 3	0.069a ± 0.007	4.462b ± 2.773	0.578a ± 0.234	3.003a ± 1.223	5.937b ± 0.315
	CV	10.586	62.139	40.56	40.711	5.314

4.5 Comparación entre los rodales

Para esta sección todas las muestras generadas en cada rodal (*E. camaldulensis*, *O. ficus indica* y entre especies) fueron usadas para realizar el análisis estadístico entre los rodales. Se puede observar que en las tres propiedades físicas se presentaron diferencias estadísticas significativas ($P <$

0.1), mientras que, para las propiedades químicas, a excepción del Nt, también se encontraron diferencias significativas entre los rodales.

4.5.1 Propiedades físicas de los rodales

Para la DAP, en su análisis de comparación de medias (Tukey, $\alpha < 0.05$) se presentaron diferencias significativas muy altas ($P < 0.001$); el rodal 2 con media y desviación estándar de $1.238 \pm 0.151 \text{ g}\cdot\text{cm}^3$, y el rodal 3 con $1.225 \pm 0.077 \text{ g}\cdot\text{cm}^3$ presentaron los menores valores de las medias analizadas, mientras que el rodal 1 fue el que presentó la media con mayor valor de $1.364 \pm 0.032 \text{ g}\cdot\text{cm}^3$ (Cuadro 13). La variación que se presentó en los tres rodales fue baja con $CV_{\text{prom}} = 7.86$ y sus datos analizados variaron de $1.02 - 1.47 \text{ g}\cdot\text{cm}^3$. Estos resultados coinciden solo cuando se analizaron las muestras ubicadas entre las especies y fueron comparadas entre los tres rodales (Cuadro 12). Ávila (1963), reportó para los primeros 20 cm del suelo medias de DAP que iban de $1.35 - 1.47 \text{ g}\cdot\text{cm}^3$, las cuales después de más de 50 años establecida la plantación han disminuido de acuerdo a las medias obtenidas en el rodal 2 y 3, mejorando el estado de la compactación y porosidad del suelo. Este mejoramiento en la porosidad se debe a que la DAP es inversamente proporcional a la porosidad por lo que una baja DAP conlleva el aumento en la porosidad (Osman, 2013b). El aumento de la MO que ha aportado la vegetación permitió la disminución en los niveles de esta propiedad confirmando la relación inversa entre la DAP y los contenidos de MO (Salamanca-Jimenez y Siavosh-

Khalajabadi, 2005). La media más alta de DAP se encontró en el rodal 1, similar a los valores medios que anteriormente fueron reportados, observando que, en este rodal no hubo un cambio significativo de esta propiedad con el paso del tiempo. Broquen *et al.* (1995), han reportado para una plantación de coníferas, que la DAP no cambia con la edad de esta, resultado similar al rodal 1 (con *E. camaldulensis* y *O. ficus-indica*) pero contrario al rodal 2 (con *E. camaldulensis* y *O. ficus-indica*) y al rodal 3 (solo con *E. camaldulensis*).

Para la EA al realizar el ANOVA se encontraron diferencias significativas bajas ($P < 0.1$), y al aplicar la prueba Tukey ($\alpha < 0.05$) se obtuvieron diferencias significativas. El rodal 1 presentó la mayor media con 62.402 ± 11.835 % mientras que el rodal 3 registró la menor con 47.097 ± 13.853 % (Cuadro 13). En los tres rodales hubo una variabilidad moderada en los datos analizados, presentando un valor de $CV_{prom} = 24.70$, con datos analizados que oscilaron de 25.91 - 78.67 %. Destacando que solo cuando se tomaron en cuenta todos los datos, se pudieron detectar mejor las diferencias estadísticas en esta propiedad, lo cual explica que disminuye el coeficiente de variación y al aumentar las observaciones, se pueden detectar mejor las diferencias. El rodal que contó con la menor cantidad de estabilidad de agregados fue el que solo presentó una sola especie, mientras que el rodal con mayor agregación contó con dos especies. Esta propiedad es relacionada inversamente con la DAP, ya que cuando sus valores aumentan la densidad tiende a disminuir (Gutiérrez *et al.*, 2015), lo cual se observó en el rodal 2, que tuvo una media alta en su EA y un bajo valor de DAP. La aplicación de MO (material orgánico compostado) en

los rodales con poca agregación, puede ayudar en el mejoramiento de la estabilidad de los agregados, aunque es importante conocer la manipulación inicial del terreno pues las dosis aplicadas pueden responder de diferente forma (Chirinos, 2007).

Para el caso de la Profundidad, al realizar la comparación de medias (Tukey, $\alpha < 0.05$) se encontraron diferencias significativas muy altas ($P < 0.0001$). Dos rodales presentaron altos valores en sus medias: el rodal 1 con 21.338 ± 2.807 cm y una baja variabilidad con $CV = 13.15$, y el rodal 3 con 19.542 ± 7.303 cm y variabilidad moderada de $CV = 37.37$ (Cuadro 13). El rodal que tuvo la menor media fue el rodal 2 con 7.739 ± 5.519 cm, además de tener una variabilidad muy alta con $CV = 71.32$ sobre el suelo (Cuadro 13). Los bajos valores encontrados en el rodal 2 se deben a que en este se encontró un suelo muy heterogéneo con zonas donde afloraba el tepetate, y con profundidades que podían variar de 0 a 17.33 cm. Contrario a la moderada variación en las profundidades de los otros rodales, en donde el tepetate no se presentaba superficialmente. El conocimiento de las profundidades sobre el terreno ayuda en la aplicación de tratamientos agronómicos puntuales, como pueden ser la densidad de siembra o niveles de fertilización, permitiendo mejorar el potencial productivo de cada tipo de suelo (Frolla *et al.*, 2015).

Cuadro 13. Comparación entre rodales de las propiedades físicas generalizadas.

Rodal	DAP (g·cm ³) Media	EA (%) Media	Profundidad (cm) Media
Rodal 1	1.364a ± 0.032	62.402a ± 11.835	21.338a ± 2.807
CV	2.36	18.97	13.15
Rodal 2	1.238b ± 0.151	52.817ba ± 15.076	7.739b ± 5.519
CV	12.20	28.54	71.32
Rodal 3	1.225b ± 0.077	47.097b ± 13.853	19.542a ± 7.303
CV	6.29	29.41	37.37

4.5.2 Propiedades químicas de los rodales

Para el P en el análisis de medias (Tukey, $\alpha < 0.05$) se encontraron diferencias estadísticas, pero estas fueron moderadas ($P < 0.5$). Los rodales que presentaron las mayores medias fueron el rodal 2 con 8.530 ± 4.396 ppm y el rodal 3 con 6.126 ± 3.120 ppm, mientras que el rodal 1 tuvo el menor valor en su media con 5.022 ± 2.456 ppm. En general, los tres rodales presentaron una variabilidad alta (Cuadro 14) con un $CV_{prom} = 52.25$ y los datos analizados variaron de 1.242 - 17.391 ppm. Ávila (1963), reportó para esta zona al inicio del establecimiento de la plantación valores de 5.95 - 8.05 ppm, ligeramente menores a las medias presentadas en los rodales 2 y 3, observando que a través de los años hubo ligeros cambios, similar a lo reportado por Seenivasan *et al.* (2015), quienes registraron leves aumentos en el P al rehabilitar suelos sódicos y contrario a lo reportado por Jaiyeoba (2001), donde una plantación de *E. camaldulensis* no tuvo cambios en el fósforo a través del tiempo. Para el caso del rodal 1, los niveles de fósforo encontrados fueron menores a los reportados por Ávila (1963) al inicio de la plantación, lo cual pudo deberse a que

en este rodal en la actualidad cuenta con una especie más (*O. ficus-indica*), y que es más abundante en comparación a los otros dos rodales y a la especie originalmente establecida, y por tanto, al requerir de este nutriente disponible en el suelo, tiende a disminuir su concentración.

Para el K al realizar el análisis estadístico de medias (Tukey, $\alpha < 0.05$) se encontraron diferencias estadísticas muy altas ($P < 0.001$), en donde el rodal 1 con media de $0.277 \pm 0.105 \text{ me} \cdot 100\text{g}^{-1}$ y un CV = 37.80, así como el rodal 2 con media de $0.408 \pm 0.250 \text{ me} \cdot 100\text{g}^{-1}$ y mayor variabilidad con CV = 61.28, fueron los que presentaron los menores valores en sus medias, mientras que el rodal 3 presentó la mayor media de 0.582 ± 0.204 y una variabilidad de CV = 35.00 (Cuadro 14). Los rangos del total de datos analizados fueron de 0.122 - 0.992 $\text{me} \cdot 100\text{g}^{-1}$. La variación que se identificó en los resultados registrados hace 50 años para esta propiedad fue de 0.075 - 0.160 $\text{me} \cdot 100\text{g}^{-1}$ (Ávila, 1963), las cuales al ser comparados con los resultados actuales presentan ligeros aumentos de esta propiedad sobre el suelo. Esto concuerda con otros resultados en donde se reportan incrementos (después de 25 años) en las propiedades químicas del suelo en plantaciones de *E. camaldulensis* (Jaiyeoba, 2001), en rehabilitaciones de suelos sódicos con 3 años de establecida la plantación (Seenivasan *et al.*, 2015), así como en plantaciones con *E. tereticornis* con 9 años de edad en donde también hubo un incremento de esta propiedad (Mishra *et al.*, 2003). Además, se destaca que en los rodales donde se presentan menores cantidades de este elemento son los que tienen

presencia de la *O. ficus-indica*, mientras que el que tiene mayor cantidad no presenta esta especie.

En el caso de la MO el análisis de comparación de medias de Tukey, ($\alpha < 0.05$) entre los rodales mostró diferencias significativas muy altas ($P < 0.0001$), siendo el rodal 2 con media y desviación estándar de 4.904 ± 2.465 % y una alta variabilidad en sus datos con un CV = 50.26 el que tuvo la mayor cantidad de MO (Cuadro 14). El rodal 1 con una media de 2.503 ± 0.629 % y una menor variabilidad en sus datos con CV = 25.14, y el rodal 3 con media de 2.566 ± 0.945 y una variabilidad moderada de sus datos con CV = 36.81, fueron los que tuvieron las menores cantidades de MO en los rodales (Cuadro 14). El total de los valores analizados tuvieron valores que fueron de 1.613 - 11.564 %.

El rodal que presentó la mayor cantidad de MO puede beneficiarse con el mejoramiento de algunas propiedades físicas como por ejemplo en su estabilidad estructural (Betancourt *et al.*, 1999), ya que esta propiedad tiene la capacidad de influir en la agregación en el suelo (Osman, 2013b). Las medias encontradas en este estudio en los tres rodales fueron mayores a las reportadas al inicio de la plantación por Ávila (1963), quien obtuvo valores que oscilaban de 0.200 - 0.370 %. Mishra *et al.* (2003), indican que en plantaciones que contienen *E. tereticornis* la materia orgánica es la principal fuente de nitrógeno para el suelo además de que está directamente relacionada con el incremento de P disponible y K^+ . Para este estudio que integra al *E. camaldulensis*, se observó que esta relación se presenta principalmente en el

fósforo, pues en los rodales donde hubo altas cantidades de MO también presentaron altas cantidades de P.

En el análisis estadístico (Tukey, $\alpha < 0.05$) aplicado para el pH también se encontraron diferencias estadísticas significativas muy altas ($P < 0.0001$). Los rodales que tuvieron mayores valores en sus medias fueron el rodal 1 con 7.097 ± 0.638 y el rodal 2 con 7.242 ± 0.459 , mientras que el rodal 3 tuvo el menor valor con 5.886 ± 0.370 (Cuadro 14). La variabilidad que presentaron los tres rodales en sus datos fue baja con un $CV_{\text{prom}} = 7.57$. De acuerdo a las clasificaciones de acidez y alcalinidad, los rodales 1 y 2 con las mayores medias presentaron una alcalinidad muy débil considerándose suelos neutros, mientras que el rodal 3 con la menor media presentó una acidez moderada. Los rodales con pH neutro fueron los que tuvieron la presencia de *O. ficus-indica*, mientras que el rodal con acidez moderada no contaba con la presencia de esta especie. Jaiyeoba (2001), reporta que el pH en un suelo con plantación de *E. camaldulensis* (de 27 años de edad) se incrementó con el paso del tiempo. Sin embargo, en el rodal 3 donde solo se tenía la presencia de *E. camaldulensis*, se generó una disminución en el pH, pasando de una media reportada por Ávila (1963) al inicio del establecimiento de la plantación de 7.3, a la actual de 5.886, mientras que en los rodales donde se tenía *O. ficus-indica* se mantuvo casi igual. El mantenimiento de los valores de pH con el tiempo han sido registrados en plantaciones de *Pinus ponderosa* (de 17 a 52 años de edad) donde no se registraron incrementos en la acidez (Broquen *et al.*, 1995). La presencia de un pH 7 en los rodales 1 y 2, ayuda en el mantenimiento de los ácidos húmicos, los

cuales influyen en el incremento de la estabilidad de agregados (Gutiérrez *et al.*, 2015), relación que se refleja en estos rodales ya que tuvieron altas medias en su EA.

Para el caso del Nt, el análisis estadístico realizado (Tukey, $\alpha < 0.05$) no indicó diferencias estadísticas significativas ($P > 0.1$), mostrando una baja variabilidad en los datos ($CV_{prom} = 10.06$). Ávila (1963), reportó al inicio del establecimiento de la plantación que este elemento fue extremadamente pobre, con valores de 0.030 - 0.036 %, mientras que para este estudio se encontraron medias que los duplicaron observando un aumento con el paso de los años. Jaiyeoba (2001) reportó ligeros aumentos de esta propiedad a través del tiempo (25 años) en una plantación de *E. camaldulensis*, de la misma forma, Mishra *et al.* (2003), registró un aumento de N pero para el caso de una plantación de *E. tereticornis* con una edad de 9 años. Para este caso independientemente de la presencia o no de la especie *O. ficus-indica*, la presencia de este elemento fue homogénea en los tres rodales y su incremento con respecto a los niveles originales se pueden asociar con el incremento de la materia orgánica en donde, al ser mineralizados los residuos, se tiende a la liberación de nitrógeno.

Cuadro 14. Comparación entre rodales de las propiedades químicas generalizadas.

Rodal	Nt % Media	P (ppm) Media	K (me·100g ⁻¹) Media	MO (%) Media	pH Media
Rodal 1	0.066a±0.005	5.022b±2.456	0.277b±0.105	2.503b±0.629	7.097a±0.638
CV	7.70	48.90	37.80	25.14	8.99
Rodal 2	0.064a±0.007	8.530a±4.396	0.408b±0.250	4.904a±2.465	7.242a±0.459
CV	11.32	51.54	61.28	50.26	6.34
Rodal 3	0.064a±0.007	6.126ba±3.120	0.582a±0.204	2.566b±0.945	5.886b±0.370
CV	11.41	50.93	35.00	36.81	6.28

En general, se observó que en la mayoría de las propiedades (tanto físicas y químicas) se presentaron grandes dispersiones en los datos, habiendo también propiedades como el pH, Nt y DAP que se comportaron de forma más homogénea. Esto debido que para el establecimiento de los árboles se tuvo que roturar el suelo ya que estos eran someros y tepetatosos, y con el paso del tiempo, las propiedades han cambiado de forma distinta y abrupta en diferentes zonas. Las propiedades en los suelos rehabilitados suelen ser muy variables cuando estos tienen poco tiempo de haber sido recuperados (Gasch *et al.*, 2014). Aunque para este caso, por contar con gravas de tepetate (más densas) y suelos someros puede tardar mucho más tiempo en poder alcanzar condiciones homogéneas en las propiedades del terreno.

5. CONCLUSIONES

La especie *E. camaldulensis* ha aportado con el paso del tiempo, cantidades significativas de materia orgánica, a través de su hojarasca y corteza desprendida, influyendo y mejorando el desarrollo de otras propiedades como el nitrógeno, fósforo, potasio, estabilidad de agregados, densidad aparente y profundidad.

La especie *O. ficus-indica* se ha establecido con éxito a pesar de las bajas cantidades de nutrimentos químicos (nitrógeno, fósforo y potasio) encontrados en los rodales evaluados, observando una demanda, principalmente de nitrógeno en los rodales donde se ha establecido.

El impacto que tiene la combinación de *O. ficus-indica* y *E. camaldulensis* sobre las propiedades físicas y químicas del suelo, es poca, y solo se observó que la primera especie tiene una demanda de nitrógeno sobre el suelo cuando se evaluó por rodal.

Al evaluar las propiedades de manera individual por rodal y tipo de muestra, no se encontraron diferencias entre las medias analizadas, aunque se encontró una gran variabilidad de los datos, situación que pudo deberse al bajo número de muestras que se tomaron para los análisis por rodal y tipo de muestra. Sin embargo, al tomar todas las muestras y analizarlas en su conjunto, se

identificaron diferencias entre las medias analizadas, lo que pudo deberse a la mayor cantidad de datos que se utilizaron para este tipo de análisis.

La gran variabilidad encontrada en los datos puede ser influida por la manipulación inicial y el tipo de suelo. Ya que, al ser alterados (por medio de la roturación del tepetate para establecer los árboles), su recuperación no fue homogénea, siendo más puntual en las zonas donde los árboles se desarrollaron con éxito, permitiendo que la vegetación influyera en mayor proporción sobre las áreas que fueron más propicias para su desarrollo, que en donde había más limitantes.

ANEXO

a) RESULTADOS QUÍMICOS

Rodal	Cuadrantes	Tipo de muestra	P (ppm)	K (me·100g ⁻¹)	Nt (%)	MO	pH
1	AM1C13	Entre especies	1.2422	0.3699	0.071	3.4963	7.76
1	AM1C13	<i>O. ficus-indica</i>	3.7267	0.2581	0.074	3.2273	7.72
1	AM1C13	<i>E. camaldulensis</i>	3.4483	0.2740	0.067	3.7652	7.36
1	AM1C24	Entre especies	6.8323	0.1599	0.063	2.0171	7.67
1	AM1C24	<i>O. ficus-indica</i>	7.4534	0.3816	0.062	2.4205	7.80
1	AM1C24	<i>E. camaldulensis</i>	4.9689	0.1763	0.064	2.4205	7.30
1	AM2C13	Entre especies	4.9689	0.3395	0.063	2.0171	7.34
1	AM2C13	<i>O. ficus-indica</i>	4.9689	0.3395	0.066	2.0171	7.46
1	AM2C13	<i>E. camaldulensis</i>	1.8634	0.1487	0.062	2.2860	6.51
1	AM2C24	Entre especies	1.2422	0.5031	0.059	1.6137	7.51
1	AM2C24	<i>O. ficus-indica</i>	6.2112	0.4678	0.080	2.6894	7.55
1	AM2C24	<i>E. camaldulensis</i>	4.9689	0.2267	0.064	2.4205	7.24
1	AM3C13	Entre especies	9.9379	0.1829	0.063	1.8826	5.70
1	AM3C13	<i>O. ficus-indica</i>	4.3478	0.2438	0.064	2.1516	7.03
1	AM3C13	<i>E. camaldulensis</i>	9.9379	0.2098	0.063	2.4205	6.25
1	AM3C24	Entre especies	4.9689	0.2469	0.064	2.0171	6.64
1	AM3C24	<i>O. ficus-indica</i>	4.3478	0.2990	0.063	2.5550	6.97
1	AM3C24	<i>E. camaldulensis</i>	4.9689	0.1640	0.069	3.6307	5.94
2	AM4C13	<i>E. camaldulensis</i>	3.1056	0.2131	0.062	4.4376	7.53
2	AM4C13	Entre especies	6.8966	0.1896	0.069	2.8239	7.10
2	AM4C13	<i>O. ficus-indica</i>	3.1056	0.3586	0.063	3.7652	7.41
2	AM4C24	<i>E. camaldulensis</i>	5.5901	0.2838	0.066	2.9584	6.44
2	AM4C24	Entre especies	6.2112	0.3231	0.067	3.6307	6.05
2	AM4C24	<i>O. ficus-indica</i>	13.6646	0.2448	0.062	2.6894	6.60
2	AM5C13	<i>E. camaldulensis</i>	4.9689	0.2533	0.060	3.6307	7.52
2	AM5C13	Entre especies	5.5901	0.2599	0.060	3.2273	7.71
2	AM5C13	<i>O. ficus-indica</i>	4.9689	0.4095	0.060	2.9584	7.62
2	AM5C24	<i>E. camaldulensis</i>	7.4534	0.3359	0.062	5.1099	7.50

Cotina...

a) RESULTADOS QUÍMICOS (Continuación)

2	AM5C24	Entre especies	15.5280	0.2712	0.062	3.3618	7.31
2	AM5C24	<i>O. ficus-indica</i>	8.6957	0.1221	0.060	6.4547	7.22
2	AM6C13	<i>E. camaldulensis</i>	6.2112	0.7732	0.059	7.2615	7.27
2	AM6C13	Entre especies	12.6437	0.4134	0.090	4.1686	7.40
2	AM6C13	<i>O. ficus-indica</i>	13.0435	0.8052	0.064	6.5891	7.29
2	AM6C24	<i>E. camaldulensis</i>	.	.	.	.	.
2	AM6C24	Entre especies	17.3913	0.6883	0.060	8.7407	7.51
2	AM6C24	<i>O. ficus-indica</i>	9.9379	0.9929	0.062	11.5646	7.64
3	AM7C13	<i>E. camaldulensis</i>	9.3168	0.4645	0.059	2.1516	6.21
3	AM7C13	Entre especies	1.2422	0.2857	0.063	2.9584	6.32
3	AM7C24	<i>E. camaldulensis</i>	5.7471	0.3065	0.059	2.1516	5.82
3	AM7C24	Entre especies	2.4845	0.4584	0.078	5.1099	5.61
3	AM8C13	<i>E. camaldulensis</i>	4.9689	0.5279	0.059	2.0171	5.50
3	AM8C13	Entre especies	5.5901	0.7635	0.076	3.3618	6.27
3	AM8C24	<i>E. camaldulensis</i>	11.1801	0.6857	0.059	2.2860	6.44
3	AM8C24	Entre especies	8.0745	0.3978	0.069	1.6137	5.97
3	AM9C13	<i>E. camaldulensis</i>	5.5901	0.8382	0.059	2.1516	5.80
3	AM9C13	Entre especies	6.8966	0.6689	0.059	2.0171	5.58
3	AM9C24	<i>E. camaldulensis</i>	9.9379	0.6947	0.059	2.0171	5.24
3	AM9C24	Entre especies	2.4845	0.8942	0.071	2.9584	5.87

b) RESULTADOS FÍSICOS

Rodal	Cuadrantes	Tipo de muestra	DA	Aest	Prof
1	AM1C13	Entre especies	1.35	47.022	22.59
1	AM1C13	<i>O. ficus-indica</i>	1.33	48.598	22.00
1	AM1C13	<i>E. camaldulensis</i>	1.30	63.252	23.17
1	AM1C24	Entre especies	1.35	72.797	21.15
1	AM1C24	<i>O. ficus-indica</i>	1.39	77.253	23.40
1	AM1C24	<i>E. camaldulensis</i>	1.37	45.833	18.90
1	AM2C13	Entre especies	1.39	68.530	18.50
1	AM2C13	<i>O. ficus-indica</i>	1.35	65.781	14.80
1	AM2C13	<i>E. camaldulensis</i>	1.43	78.671	22.20
1	AM2C24	Entre especies	1.43	74.755	24.88
1	AM2C24	<i>O. ficus-indica</i>	1.37	69.124	25.25
1	AM2C24	<i>E. camaldulensis</i>	1.33	41.833	24.50
1	AM3C13	Entre especies	1.35	53.259	22.17
1	AM3C13	<i>O. ficus-indica</i>	1.35	54.922	20.33
1	AM3C13	<i>E. camaldulensis</i>	1.35	75.506	24.00
1	AM3C24	Entre especies	1.35	68.976	18.75
1	AM3C24	<i>O. ficus-indica</i>	1.37	62.559	19.00
1	AM3C24	<i>E. camaldulensis</i>	1.39	54.571	18.50
2	AM4C13	<i>E. camaldulensis</i>	1.39	76.182	10.50
2	AM4C13	Entre especies	1.47	25.912	13.59
2	AM4C13	<i>O. ficus-indica</i>	1.37	69.892	16.67
2	AM4C24	<i>E. camaldulensis</i>	1.43	47.455	10.00
2	AM4C24	Entre especies	1.35	68.537	13.67
2	AM4C24	<i>O. ficus-indica</i>	1.43	62.087	17.33
2	AM5C13	<i>E. camaldulensis</i>	1.28	66.341	8.00
2	AM5C13	Entre especies	1.25	42.105	8.30
2	AM5C13	<i>O. ficus-indica</i>	1.26	39.698	8.60
2	AM5C24	<i>E. camaldulensis</i>	1.16	60.000	9.33

Cotina...

b) RESULTADOS FÍSICOS (Continuación)

2	AM5C24	Entre especies	1.19	70.638	8.17
2	AM5C24	<i>O. ficus-indica</i>	1.11	54.581	7.00
2	AM6C13	<i>E. camaldulensis</i>	1.06	38.605	3.50
2	AM6C13	Entre especies	1.18	55.556	0.00
2	AM6C13	<i>O. ficus-indica</i>	1.04	46.372	3.66
2	AM6C24	<i>E. camaldulensis</i>	.	.	0.00
2	AM6C24	Entre especies	1.04	29.299	0.00
2	AM6C24	<i>O. ficus-indica</i>	1.02	44.628	1.00
3	AM7C13	<i>E. camaldulensis</i>	1.20	48.427	17.00
3	AM7C13	Entre especies	1.20	33.636	20.00
3	AM7C24	<i>E. camaldulensis</i>	1.22	68.213	10.00
3	AM7C24	Entre especies	1.04	27.042	10.00
3	AM8C13	<i>E. camaldulensis</i>	1.28	55.921	32.00
3	AM8C13	Entre especies	1.16	69.043	23.00
3	AM8C24	<i>E. camaldulensis</i>	1.22	46.154	18.00
3	AM8C24	Entre especies	1.20	32.686	15.00
3	AM9C13	<i>E. camaldulensis</i>	1.33	43.527	25.50
3	AM9C13	Entre especies	1.28	60.950	22.00
3	AM9C24	<i>E. camaldulensis</i>	1.32	39.917	30.00
3	AM9C24	Entre especies	1.23	39.648	12.00

LITERATURA CITADA

- Adame-Martínez, S., Oropeza-Mota, J. L., Martínez-Méñez, M. R., Santoyo-Cortés, V. H. y Ramírez-Guzmán, M. E. (2000). Evaluación económica del proyecto de rehabilitación de suelos en la cuenca del río Texcoco. *Agrociencia*, 34, 509–521.
- Alvarado, A. y Fallas, J. L. (2004). La saturación de acidez y el encalado sobre el crecimiento de la teca (*tectona grandis* l.f.) en suelos ácidos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 28(1), 81–87.
- Alvarado, A. y Forsythe, W. (2005). Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 29(1), 85–94.
- Álvarez-Sánchez, M. E., Hernández-Acosta, E., Maldonado-Torres, R. y Rivera-González, M. (2013). Lime and mycorrhizae in the phosphorus deficiencies correction in an andisol cultivated with *Pinus halepensis* Mill. *Madera Bosques*, 19(1), 7–16.
- Alvear, M., Urra, C., Huaiquilao, R., Astorga, M. y Reyes, F. (2007). Actividades biológicas y estabilidad de agregados en un suelo del bosque templado chileno bajo dos etapas sucesionales y cambios estacionales. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 7(3), 38–50. <http://doi.org/10.4067/S0718-27912007000300004>
- Asteinza, B. G. y Rey, C. J. A. (1987). Evaluación ecológica de la plantación de nopal (*Opuntia ficus-indica*) en la zona de tepetates de San Pablo Ixayoc, Estado de México. En *Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural* (pp. 172–178). Chapingo, México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Ávila-Campuzano, G. R., Gutierrez-Castorena, M. del C., Ortiz-Solorio, C. A., Ángeles-Cervantes, E. y Sánchez-Guzmán, P. (2011). Evaluación de las Reforestaciones en la Formación de Suelo a partir de Tepetates. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales Y Del Ambiente*, 17(3), 303–312. <http://doi.org/10.5154/r.rchsc/2010.11.113>
- Ávila, H. M. (1963). *Recuperación de suelos erosionados de Chapingo, México con plantaciones forestales*. Escuela Nacional de Agricultura, Texcoco, México.
- Betancourt, Y. P., González, R. J., Figueroa, S. B. y González, F. C. (1999). Materia orgánica y caracterización de suelos en proceso de recuperación con coberturas vegetativas en zonas templadas de México. *Terra*, 17(2), 139–148.
- Blanco-Sepúlveda, R. (2009). La relación entre la densidad aparente y la resistencia mecánica como indicadores de la compactación del suelo. *Agrociencia*, (43), 231–239.
- Bolan, N. S. y Kandaswamy, K. (2005). pH. En D. Hillel, C. Rosenzweig, D. Powlson, K. Scow, M. Singer y D. Sparks (Eds.), *Encyclopedia of soils in the environment* (1a ed., Vol. 3, pp. 196–202). New York: Academic Press.
- Bravo-Hollis, H. (1978). *Las cactáceas de México* (2a ed., Vol. 1). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Broquen, P., Girardin, J. L. y Frugoni, M. C. (1995). Evaluación de algunas propiedades de suelos derivados de cenizas volcánicas asociadas con forestaciones de coníferas exóticas (S.O. de la provincia de Neuquén - R.

- Argentina). *Bosque*, 16(2), 69–79.
- Bruijnzeel, L. A. (1998). *Soil chemical changes after tropical forest disturbance and conversion: The hydrological perspective*. (A. Schulte y D. Ruhayat, Eds.) *Soils of Tropical Forest Ecosystems: Characteristics, Ecology and Management*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <http://doi.org/10.1007/978-3-662-03649-5>
- Brunel, N. y Seguel, O. (2011). Efectos de la erosión en las propiedades del suelo. *Agro Sur*, 39(1), 1.
- Camps-Arbestain, M., Macías, F. y Chesworth, W. (2008). Soil. En W. Chesworth (Ed.), *Encyclopedia of soil science* (1a ed., pp. 629–634). Springer. <http://doi.org/10.1007/978-3-642-27848-8>
- Castellanos-Navarrete, A., Chocobar, A., Cox, R. A., Fonteyne, S., Govaerts, B., Jaspers, N. y Verhulst, N. (2013). Estabilidad de los agregados del suelo tamizado en humedo: Guía útil para comparar las prácticas de manejo de cultivo. México, D.F.: Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo.
- Chirinos, I. J. (2007). Evaluación de la estabilidad de agregados de dos suelos de Masquefa como respuesta a diferentes dosis de material orgánico compostado. *Ciencia*, 15(1), 47–53.
- Choi, Y. D. (2007). Restoration ecology to the future: a call for new paradigm. *Restoration Ecology*, 15(2), 351–353. <http://doi.org/DOI 10.1111/j.1526-100X.2007.00224.x>
- CONAFOR, C. N. F. (2014). Indicadores Básicos del Desempeño Ambiental sobre el Suelo de México. Recuperado el 13 de mayo de 2016, a partir de <http://www.cnf.gob.mx:8090/snif/portal/las-demas/estadisticas-del-medio-ambiente/suelos>
- Cotler, Á. H. (2010). Medio Ambiente. En J. L. Lezama & B. Graizbord (Eds.), *Los grandes problemas de México: Medio Ambiente* (1a ed., Vol. 4, p. 429). México, D.F.: El Colegio de México.
- Coyne, M. S. y Frye, W. W. (2005). Nitrogen in Soils: Cycle. En D. Hillel, C. Rosensweig, D. Powlson, K. Scow, M. Singer, & D. Sparks (Eds.), *Encyclopedia of soils in the environment* (1a ed., Vol. 3, pp. 13–21). New York: Academic Press.
- Cristobal, A. D. (2004). *Apuntes de curso de restauración ambiental*. Texcoco: UACH.
- Delgado-Matas, C. y Pukkala, T. (2013). Growth models based on radial increment observations for eight pine species in Angola. *Southern Forests: a Journal of Forest Science*, 75(1), 19–27. <http://doi.org/10.2989/20702620.2013.743766>
- DOF, D. O. de la F. Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación en los países afectados por sequía grave o desertificación, en particular en África (1995). México: Diario Oficial de la Federación.
- Eldridge, D. J. y Wong, V. N. L. (2005). Clumped and isolated trees influence soil nutrient levels in an Australian temperate box woodland. *Plant and Soil*, 270(1), 331–342. <http://doi.org/10.1007/s11104-004-1774-2>
- Ezcurra, E. (1992, enero). Crecimiento y colapso en la cuenca de México. *Ciencias*, (25), 13–27.

- Fajardo, O. A. G. (2013). *Carbono almacenado en la estación experimental "Mario Ávila" 50 años después de su reforestación*. Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, México.
- FAO. (2002). Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010: Informe principal. Estudio FAO Montes. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la Alimentación (FAO).
- FAO, O. de las N. U. para la A. y la A. (2010). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010, informe principal. Forestry Paper* (Vol. 163).
- FAO, O. de las N. U. para la A. y la A. (2015). *Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2015: Compendio de datos*. Roma.
- Fassbender, H. W. y Bornemisza, E. (1994). *Química de Suelos: con énfasis en suelos de América Latina* (1a ed.). San José, C. R.: IICA.
- FRA, R. F. M. (2015). Documento de trabajo de la evaluación de los recursos forestales No. 180: FRA 2015, Términos y Definiciones. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la Alimentación (FAO).
- Frolla, F. D., Zilio, J. P., y Kruger, H. (2015). Variabilidad espacial de la profundidad del suelo. Métodos de interpolación para el sudoeste bonaerense. *Revista de investigaciones agropecuarias*, 41(3).
- García, Y., Ramírez, W., y Sánchez, S. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos Y Forrajes*, 35(2), 125–137.
- Gardi, C., Angelini, M., Barceló, S., Comerma, J., Cruz Gaistardo, C., Encina Rojas, A. y Vargas, R. (2014). *Atlas de suelos de América Latina y el Caribe*. (C. Gardi, M. Angelini, S. Barceló, J. Comerma, C. Cruz Gaistardo, A. Encina Rojas, R. Vargas, Eds.). Luxemburgo: Comisión Europea - Oficina de Publicaciones de la Unión Europea. <http://doi.org/10.2788/37334>
- Gasch, C., Huzurbazar, S. y Stahl, P. (2014). Measuring soil disturbance effects and assessing soil restoration success by examining distributions of soil properties. *Applied Soil Ecology*, 76, 102–111. <http://doi.org/10.1016/j.apsoil.2013.12.012>
- Gómez-Díaz, D. J. (2016). *Comunicación Personal*.
- Gonzalez, R., Treasure, T., Phillips, R., Jameel, H., Saloni, D., Abt, R. y Wright, J. (2011). Converting Eucalyptus biomass into ethanol: Financial and sensitivity analysis in a co-current dilute acid process. Part II. *Biomass and Bioenergy*, 35(2), 767–772. <http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.10.025>
- Granados-Sánchez, D. y López-Ríos, G. F. (2007). Fitogeografía y ecología del género Eucalyptus. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 13(2), 143–156.
- Gutiérrez, C. J., González, C. G., Segura, C. M., Sánchez, C. I., Orozco, V. J. A. y Fortis, H. M. (2015). Efecto de ácidos húmicos de Leonardita en la estabilidad de agregados del suelo y raíces de melón en condiciones de invernadero. *Revista Internacional de Botánica Experimental*, 84, 298–305.
- Gutiérrez, G. M., Sánchez, M. G. y Sandoval, C. L. (2006). *Eucaliptos que habitan en norte y centro de México: Manual para su determinación*. (INIFAP-CIRNOC, Ed.) (1a ed.). México.
- Haider, K. M., y Guggenberger, G. (2005). Organic Matter: Genesis and

- Formation. En D. Hillel, C. Rosenzweig, D. Powlson, K. Scow, M. Singer y D. Sparks (Eds.), *Encyclopedia of soils in the environment* (1a ed., Vol. 3, pp. 93–101). New York: Academic Press.
- Hao, G., Yun, F., Fangfang, L., yang, L., WenLi, Y. y Yin, Y. (2016). Soil diagnosis and land suitability assessment for vegetation restoration on coal waste piles in Liupanshui, Guizhou, China. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 30(3), 209–216. <http://doi.org/10.1080/17480930.2015.1036519>
- Harmand, J.-M., Njiti, C. F., Bernhard-Reversat, F. y Puig, H. (2004). Aboveground and belowground biomass, productivity and nutrient accumulation in tree improved fallows in the dry tropics of Cameroon. *Forest Ecology and Management*, 188(1–3), 249–265. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.07.026>
- Hill, R. S. (1994). The history of selected Australian taxa. En R. S. Hill (Ed.), *History of Australian Vegetation: Cretaceous to Recent* (pp. 390–419). Cambridge University Press: Cambridge.
- Hillel, D. (1998a). General physical characteristics of soils. En *Environmental soil physics* (1a ed., pp. 3–17). Academic Press.
- Hillel, D. (1998b). Soil structure and aggregation. En *Environmental soil physics* (1a ed., pp. 101–125). Academic Press.
- Hinke, N. (2000). La llegada del eucalipto a México. *Ciencias*, 58–62.
- Huang, P. M., Zhou, J. M., Xie, J. C. y Wang, M. K. (2005). Potassium in soils. En D. Hillel, C. Rosenzweig, D. Powlson, K. Scow, M. Singer, & D. Sparks (Eds.), *Encyclopedia of soils in the environment* (1a ed., Vol. 3, pp. 303–314). New York.
- IMTA, Conabio, GECI, Aridamérica, & The Nature Conservancy. (2007). *Especies invasoras de alto impacto a la biodiversidad - Prioridades en México*. (I. J. March Mifsut & M. Martínez Jiménez, Eds.). Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- INEGI. (2000a). *Base de Datos Geográficos: Diccionario de Datos Fisiográficos escala 1:1 000 000 (vectorial)*. Mexico, D.F.: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI. (2000b). *Base de Datos Geográficos: Diccionario de Datos Geológicos escala 1:50 000 (vectorial)*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI. (2004). *Guía para la interpretación de cartografía: Edafología*. México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI. (2005). *Guía para la interpretación de cartografía: Uso de suelo y vegetación* (1a ed.). México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI, I. N. de E. y G. (2014). *Sistema de Cuentas Nacionales de México: Cuentas económicas y ecológicas de México 2013*. México.
- IUSS y Grupo de trabajo WRB. (2007). *Base Referencial Mundial del Recurso Suelo: Un marco conceptual para clasificación, correlación y comunicación internacional. Informes sobre recursos mundiales de suelos* (2a ed.). Roma: FAO.
- Jaiyeoba, I. A. (2001). Soil rehabilitation through afforestation: evaluation of the

- performance of Eucalyptus and pine plantations in a Nigerian Savanna environment. *Land Degradation & Development*, 12(2), 183–194. <http://doi.org/10.1002/ldr.447>
- Jones, J. B. (2003). *Agronomic handbook: management of crops, soils, and their fertility*. CRC Press LLC.
- Jung, M. H., Shim, Y. S., Kim, T. H., Oh, J. Y. y Jung, Y. S. (2012). Characteristics of Soil Chemical Properties in Abandoned Coal Mine Forest Rehabilitation Areas in Mungyeong, Gyeongsangbuk-do. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 45(5), 733–737. <http://doi.org/10.7745/KJSSF.2012.45.5.733>
- Kuyper, T. W. y de Goede, R. G. M. (2005). *Interaction between higher plants and soil-dwelling organisms*. (F. van der Maarel, Ed.) *Vegetation Ecology* (1st ed., Vol. 1).
- León, R. (1991a). Física de suelos. En *Nueva edafología: regiones tropicales y areas templadas de mexico, características y propiedades y su influencia agricola*. (2a ed., pp. 43–76). Distribuciones Fontamara, S. A.
- León, R. (1991b). Nitrogeno. En *Nueva edafología: regiones tropicales y areas templadas de mexico, características y propiedades y su influencia agricola*. (2a ed., pp. 181–185). Distribuciones Fontamara, S. A.
- León, R. (1991c). Potasio. En *Nueva edafología: regiones tropicales y areas templadas de mexico, características y propiedades y su influencia agricola*. (2a ed., pp. 198–203). Distribuciones Fontamara, S. A.
- Levy, T. S. I., Román, D. J. R., Douterlunge, D., Aguirre-Rivera, J. R., Pérez, C. T., Zúñiga, M. J. y Sánchez, G. A. (2013). Conocimiento ecológico tradicional maya y rehabilitación de selvas. En *La biodiversidad en Chiapas: Estudio de Estado* (1a ed., Vol. 1, pp. 509–518). Chiapas: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).
- Lozano, L. (2011). Ecofisiología de la tuna (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.). *Horticultura Argentina*, 30(72), 37–52. Recuperado a partir de www.horticulturaar.com.ar
- Lugo, A. E., Silver, W. L. y Molina Colón, S. (2004). Biomass and Nutrient Dynamics of Restored Neotropical Forests. *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*, 4(2/3), 731–746. <http://doi.org/10.1023/B:WAFO.0000028390.74860.99>
- Márquez, C. O., Garcia, V. J., Cambardella, C. A., Schultz, R. C. y Isenhardt, T. M. (2004). Aggregate-Size Stability Distribution and Soil Stability. *Soil Science Society of America Journal*, 68, 725–735. <http://doi.org/10.2136/sssaj2004.0725>
- Martínez, M. S. (2008). *Plan de manejo en el area forestal experimental Ing. Mario Ávila Hernández “La Siberia”, Texcoco (Estado de México)*. Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, México.
- Meuser, H. (2013). *Soil Remediation and Rehabilitation: Treatment of Contaminated and Disturbed Land* (Vol. 23). Dordrecht: Springer Netherlands. <http://doi.org/10.1007/978-94-007-5751-6>
- Miranda Neto, A., Venâncio Martins, S., de Almeida Silva, K., Teixeira Lopes, A. y de Abreu Demolinari, R. (2014). Natural regeneration in a restored bauxite

- mine in southeast Brazil. *Bosque*, 35(3), 377–389.
<http://doi.org/10.4067/S0717-92002014000300012>
- Mishra, A., Sharma, S. D. y Gupta, M. K. (2003). Soil Rehabilitation through Afforestation: Evaluation of the Performance of *Prosopis juliflora*, *Dalbergia sissoo* and *Eucalyptus tereticornis* Plantations in a Sodic Environment. *Arid Land Research and Management*, 17(3), 257–269.
<http://doi.org/10.1080/15324980301597>
- Moreno-Calles, A. I., Toledo, V. M. y Casas, A. (2013). Los sistemas agroforestales tradicionales de México: Una aproximación biocultural. *Botanical Sciences*, 91(4), 375–398.
<http://doi.org/http://dx.doi.org/10.17129/botsoci.419>
- Mullen, M. D. (2005). Phosphorus in Soils: Biological Interactions. En D. Hillel, C. Rosenzweig, D. Powlson, K. Scow, M. Singer, & D. Sparks (Eds.), *Encyclopedia of soils in the environment* (1a ed., Vol. 3, pp. 210–216). New York: Academic Press.
- Murray, R., Bojórquez, J., Hernández, A., Orozco, M., García, J., Gómez, R. y Aguirre, J. (2011). Efecto de la materia orgánica sobre las propiedades físicas del suelo en un sistema agroforestal de la llanura costera norte de Nayarit, México. *Revista Biociencias*, 1(3), 27–35.
- Musálem, M. A., Bonilla, R. y Fierros, A. M. (1978). Arboretum de la Escuela Nacional de Agricultura. En *Primera Reunion Nacional sobre Plantaciones Forestales* (pp. 122–141). México: Subdireccion de Servicios Tecnicos de Apoyo, Oficina Editorial.
- Neffar, S., Chenchouni, H., Beddiar, A. y Redjel, N. (2013). Rehabilitation of degraded rangeland in drylands by prickly pear (*Opuntia ficus-indica* L.) plantations: effect on soil and spontaneous vegetation. *Ecologia Balkanica*, 5(2), 63–76.
- Nobel, P. S. (1989). A Nutrient Index Quantifying Productivity of Agaves and Cacti. *Journal of Applied Ecology*, 26(2), 635–645.
- Nobel, P. S. (2002). Ecophysiology of *Opuntia ficus-indica*. En C. Mondragón-Jacobo y S. Pérez-González (Eds.), *Cactus (Opuntia spp.) as forage* (2a ed., pp. 13–20). Roma: FAO.
- Nobel, P. S., Russell, C. E., Felker, P., Medina, J. G. y Acuña, E. (1987). Nutrient Relations and Productivity of Prickly Pear Cacti. *Agronomy Journal*, 79(3), 550. <http://doi.org/10.2134/agronj1987.00021962007900030030x>
- Ochoa, L. y Vargas, E. (1979). El colapso maya, los Chontales y Xicalango. *Estudio de cultura maya*, 12, 61–91. Recuperado a partir de <http://www.iifilologicas.unam.mx/estculmaya>
- Ortiz, S. L. M. M., Anaya, G. M., Saez, R. R. y Troccoli, M. A. (1987). Evaluación de la desertificación por encostramiento de óxidos de silicio en la parte media de la cuenca del río Texcoco (efecto de la tecnología aplicada y factor humano). En *Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural* (pp. 105–118). Chapingo, México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Osman, K. T. (2013a). *Forest Soils* (1a ed.). Cham: Springer International Publishing. <http://doi.org/10.1007/978-3-319-02541-4>
- Osman, K. T. (2013b). *Soils*. Dordrecht: Springer Netherlands. <http://doi.org/10.1007/978-94-007-5663-2>

- Osman, K. T. (2014). *Soil Degradation, Conservation and Remediation*. Dordrecht: Springer Netherlands. <http://doi.org/10.1007/978-94-007-7590-9>
- Pedraza, C. L. (1987). Síntesis del proceso de establecimiento y construcción de los trabajos de conservación de suelos, agua y reforestación, en áreas erosionadas de la cuenca oriental del ex-lago de Texcoco. En *Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural* (pp. 182–190). Texcoco, México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Pimentel, B. L. (2007). *Sistemas manuales de preparación del terreno con fines forestales. Serie de apoyo académico* (1a ed., Vol. 1). Texcoco: Universidad Autónoma Chapingo.
- Puigdefábregas, J. (2005). The role of vegetation patterns in structuring runoff and sediment fluxes in drylands. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30(2), 133–147. <http://doi.org/10.1002/esp.1181>
- Pulido-Moncada, M. A., Lobo-Luján, D. y Lozano-Pérez, Z. (2009). Asociación entre indicadores de estabilidad estructural y la materia orgánica en suelos agrícolas de Venezuela. *Agrociencia*, (43), 221–230.
- Read, D. J. (1991). Mycorrhizas in ecosystems. *Experientia*, 47, 376–391.
- Rey, C. J. A. (1987). Estimación de la erodabilidad de los tepetates en la cuenca del río Texcoco en base al factor K. En *Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural* (pp. 78–84). Texcoco, México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Reyes-Agüero, J. A., Aguirre-Rivera, J. R. y Hernández, H. M. (2005). Systematic notes on a detailed description of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. (Cactaceae). *Agrociencia*, 39(julio-agosto), 395–408.
- Reyes, R. J. J. A. (1972). *Evaluación de algunas propiedades del suelo bajo plantación forestal con diferentes espaciamientos*. Escuela Nacional de Agricultura, Chapingo, México.
- Reynolds, S. G. y Arias, E. (2001). Introduction. En C. Mondragón-Jacobo & S. Pérez-González (Eds.), *Cactus (Opuntia spp.) as forage* (2a ed., pp. 1–4). FAO.
- Rosales-Serrano, L. A., Segura-Castruita, M. Á., González-Cervantes, G., Potisek-Talavera, M. del C., Orozco-Vidal, J. A. y Preciado-Rangel, P. (2015). Influencia de los ácidos fúlvicos sobre la estabilidad de agregados y la raíz de melón en casa sombra. *Interciencia*, 40(5), 317–323.
- Ruiz, O. V. E. (2013). *Diversidad avifaunística en un rodal de eucalipto (eucalyptus camaldulensis y eucalyptus globulus) bajo dos condiciones ecológicas en la Siberia, Estado de México*. Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, México.
- Salamanca-Jimenez, A. y Siavosh-Khalajabadi, S. (2005). La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera Colombiana. *Cenicafé*, 56(4), 381–397.
- Sarkar, D. y Haldar, A. (2005). Soil physics. En *Physical and chemical methods in soil analysis: Fundamental concepts of analytical chemistry and instrumental techniques* (1a ed., Vol. 1, pp. 34–76). New Age International Publishers. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Sayad, E., Hosseini, S. M., Hosseini, V., & Jalali, G. (2010). The influence of eight tree plantations on soil in Southwestern of Iran. *Silva Balcanica*, 11(1),

33–44.

- Seenivasan, R., Prasath, V. y Mohanraj, R. (2015). Restoration of sodic soils involving chemical and biological amendments and phytoremediation by *Eucalyptus camaldulensis* in a semiarid region. *Environmental Geochemistry and Health*, 37(3), 575–586. <http://doi.org/10.1007/s10653-014-9674-8>
- SEMARNAT. (2003). NOM-021-RECNAT-2000. México: Diario Oficial.
- SEMARNAT. (2013). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México: Compendio de estadísticas ambientales, indicadores clave y de desempeño ambiental, edición 2012*. México.
- Semoka, J. (2008). Nitrogen Cycle. En W. Chesworth (Ed.), *Encyclopedia of soil science* (1a ed., pp. 491–493). Springer.
- Sims, J. T. y Vadas, P. A. (2005). Phosphorus in soils: Overview. En D. Hillel, C. Rosenzweig, D. Powlson, K. Scow, M. Singer, & D. Sparks (Eds.), *Encyclopedia of soils in the environment* (1a ed., Vol. 3, pp. 202–210). Academic Press.
- Snyman, H. A. (2006). A greenhouse study on root dynamics of cactus pears, *Opuntia ficus-indica* and *O. robusta*. *Journal of Arid Environments*, 65(4), 529–542. <http://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2005.10.004>
- Society for Ecological Restoration Science y Policy Working Group (SER). (2002). *The SER Primer on Ecological Restoration. Ecological Restoration*.
- USDA, D. de A. de los E. U., y NRCS, S. de C. de R. N. (2006). Los suelos que clasificamos. En D. de A. de los E. U. USDA y S. de C. de R. N. NRCS (Eds.), *Claves para la Taxonomía de Suelos* (10a ed., p. 339). Departamento de Agricultura de los Estados Unidos; Servicio de Conservación de Recursos Naturales. Recuperado a partir de http://www.mdp.edu.ar/agrarias/grado/723_Genesis/archivos/Taxonomia_Suelos_2010.pdf
- Vásquez-Méndez, R., Ventura-Ramos, E., Oleschko, K., Hernández-Sandoval, L., Parrot, J. F. y Nearing, M. A. (2010). Soil erosion and runoff in different vegetation patches from semiarid Central Mexico. *Catena*, 80(3), 162–169. <http://doi.org/10.1016/j.catena.2009.11.003>
- Weltzin, J. F. y Coughenour, M. B. (1990). Savanna tree influence on understory vegetation and soil nutrients in northwestern Kenya. *Journal of Vegetation Science*, 1(3), 325–334. <http://doi.org/10.2307/3235707>
- Williams-Linera, G., Alvarez-Aquino, C., Suárez, A., Blundo, C., Smith-Ramírez, C., Echeverría, C. y Urrutia, R. (2011). Análisis experimental de técnicas de restauración de los bosques secos. En A. C. Newton y N. Tejedor (Eds.), *Principios y Práctica de la Restauración del Paisaje Forestal* (p. 409). Unión internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), Fundación Internacional para la Restauración de Ecosistemas.
- Yang, Y. S., Guo, J. F., Chen, G. S., Xie, J. S., Gao, R., Li, Z. y Jin, Z. (2005). Litter production, seasonal pattern and nutrient return in seven natural forests compared with a plantation in southern China. *Forestry*, 78(4), 403–415. <http://doi.org/10.1093/forestry/cpi044>
- Yoder, R. E. (1936). A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *American Society of Agronomy*,

28(5), 337–351.

Yunchao, Z., Shi-jie, W., Hong-mei, L., Liping, X. y Dean, X. (2010). Forest Soil Heterogeneity and Soil Sampling Protocols on Limestone Outcrops: Example From Sw China. *Acta Carsologica*, 39(1), 115–122.

Zapata, L. y Peña-Chocarro, L. (1998). La historia del bosque y su explotación en el pasado: evidencia arqueológica y etnográfica. *Zainak*, 17, 87–99.

Zuo, X., Zhao, X., Zhao, H., Zhang, T., Guo, Y., Li, Y. y Huang, Y. (2009). Spatial heterogeneity of soil properties and vegetation–soil relationships following vegetation restoration of mobile dunes in Horqin Sandy Land, Northern China. *Plant and Soil*, 318(1–2), 153–167. <http://doi.org/10.1007/s11104-008-9826-7>