



# **COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS  
AGRÍCOLAS

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO DE EDAFOLOGÍA**

**LA REFORESTACIÓN EN LA FORMACIÓN DE SUELO A  
PARTIR DE TEPETATES**

**GABRIELA REBECA ÁVILA CAMPUZANO**

**T E S I S**

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRA EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO**

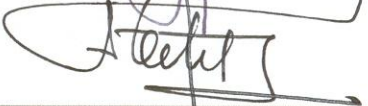
2011

La tesis titulada: **La reforestación en la formación de suelo a partir de tepetates**, realizada por la alumna: **Gabriela Rebeca Ávila Campuzano** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRA EN CIENCIAS  
ESPECIALISTA EN EDAFOLOGIA**

**CONSEJO PARTICULAR**

Consejera:   
Dra. Ma. del Carmen Gutiérrez Castorena

Asesor:   
Dr. Carlos Alberto Ortiz Solorio

Asesor:   
Dr. Efraín Angeles Cervantes

Asesor:   
M.C. Patricio Sánchez Guzmán

Montecillo, Texcoco, Estado de México. Febrero de 2011.

## **RESUMEN**

### **LA REFORESTACIÓN EN LA FORMACIÓN DE SUELO A PARTIR DE TEPETATES**

Gabriela Rebeca Ávila Campuzano, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2011

Para restaurar la vegetación de los lomeríos con tepetate y enmendar los problemas ambientales, en 1973 la Comisión del Plan Lago de Texcoco, inició un programa de conservación del suelo y del agua, a través de la reforestación en la zona de lomeríos y la pastización de las áreas bajas en los terrenos del Ex – Lago de Texcoco. Han pasado 37 años y son escasos los estudios donde se evalúe el impacto directo de las reforestaciones sobre la formación del suelo y la recuperación de sus funciones como parte del ecosistema. El presente estudio se realizó en la zona oriente del Estado de México, en donde se evaluaron los impactos edáficos de diferentes plantaciones (cedros, eucaliptos, pinos y casuarinas) sobre áreas con tepetate rojo. Se describieron tres perfiles de suelo por plantación y se realizaron análisis físicos, químicos, micromorfológicos, y de conductividad hidráulica. Las casuarinas y los cedros son las especies que más contribuyen a la formación de suelos y almacenan el agua necesaria para incrementar la recarga de los mantos acuíferos; mientras que los pinos si bien crecen en estas condiciones ambientales de la zona, su influencia es menor. Los eucaliptos forman suelo rápidamente pero lo acidifican y reducen la cantidad de bases intercambiables necesarias para la nutrición de las plantas.

**Palabras clave:** *Texcoco, Cupressus, Pinus, Casuarina, Eucalyptus.*

**ABSTRACT**

**REFORESTATION ASSESSMENT IN THE FORMATION  
OF SOIL FROM TEPETATES**

Gabriela Rebeca Ávila Campuzano, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2011

To restore the vegetation of the hills with tepetate and amend environmental problems, in 1973 the Commission of Plan lago de Texcoco, initiated a program of soil and water conservation through reforestation. It's been 37 years and there are few studies that assess the direct impact of reforestation on soil formation in order to recovery its function as part of the ecosystem. This study was conducted in the eastern part of Mexico State. It was evaluated the impact of different forestation plantation (cedar, eucalyptus, pines and casuarines) on soil formation on red tepetate. Three soil profiles were made by each planting and physical, chemical, micromorphological, and hydraulic conductivity carried out. The casuarinas trees and cedars are the species that most contribute to soil formation which is storing water needed to increase the recharge of aquifers; while pines are growing up in these environmental conditions; however, its influence is minor. The eucalypts are developing soil weakly; nevertheless, they are acidifying the soil and reducing the amount of exchangeable bases necessary for plant nutrition.

**Key words:** *Texcoco, Cupressus, Pinus, Casuarina, Eucalyptus.*

## DEDICATORIA

*A dios: por permitirme concluir esta etapa de mi vida  
ya que sin ti no hubiera sido posible, tú nuevamente  
fuiste quien me brindó los medios y me guiaste en el  
camino para que así sucediera.*

*A mis padres: por su educación y ejemplo de seguir  
hacia adelante, por querer hacer de mí una persona  
responsable y el apoyo y amor incondicional que siempre  
me brindaron en cada etapa de mi vida.*

*A mis hermanas y sobrinos: por su paciencia y apoyo que  
me brindaron a lo largo de este proyecto.*

*Al amor de mi vida: Emilie Aguirre por tu atención,  
apoyo y amor incondicional que me has brindado, simplemente ese  
complemento en donde las palabras dejan de tener sentido y surge  
ese lenguaje extraño, el lenguaje del silencio y los sentimientos...*

*A mis amigas y amigos: Juan P., Micael A. Lety M.,  
Anayeli P., Angel L., Nalleli A., Pety P., Areli C.,  
Anaceli B., Ixren, Fabiola D., Tatiana G., Carmen B.,  
Enrique, Esther, Victor D., Paul, Juan J.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y al Colegio de Postgraduados, por brindar el apoyo y facilidades al seguimiento de estudios de carácter científico de estudiantes de postgrado y darme la oportunidad de adquirir un grado en mi vida profesional.

A la Dra. Ma del Carmen Gutiérrez Castorena por ser una pieza clave en el cumplimiento de esta etapa, al darme las herramientas y ser guía para cumplir con el término de este proyecto; además de otorgarme su apoyo, amistad y confianza.

Al Dr. Efraín Ángeles Cervantes por su apoyo, tiempo, esfuerzo y amistad.

Al Dr. Carlos A. Ortiz Solorio por su apoyo, tiempo y dedicación para culminar este trabajo.

Al M. en C. Patricio Sánchez Guzmán por su atención, apoyo, tiempo, dedicación y amistad.

Al Dr. Germán Clava Vázquez por su apoyo, tiempo y darme las facilidades para trabajar en el Laboratorio de Contaminación Atmosférica de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM.

Al personal de postgrado de Edafología, especialmente a Carmen Bojorges por su apoyo y tiempo dedicados en el trámite de este proyecto; y sobre todo, por la amistad que me brindo.

Al personal del Laboratorio de Génesis, Morfología y Clasificación de suelos, especialmente a Pedro por su amistad y apoyo; además de Luis y Candelario.

A todos aquellos que participaron directamente o indirectamente en el desarrollo de este proyecto.

## CONTENIDO

	Página
I. INTRODUCCIÓN. ....	1
II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS. ....	3
2.1 . Objetivo general. ....	3
2.1.1. Objetivos específicos. ....	3
2.2. Hipótesis general. ....	3
2.2.1. Hipótesis específicas. ....	4
III. REVISIÓN DE LITERATURA. ....	5
3.1. Definición de Suelo. ....	5
3.2. Las funciones del Suelo dentro del ecosistema. ....	5
3.3. El suelo como un cuerpo natural. ....	6
3.4. El perfil del suelo. ....	6
3.5. Propiedades edáficas del suelo. ....	7
3.6. Procesos determinantes del balance de agua. ....	9
3.7. Factores de génesis del suelo. ....	12
3.8. Los procesos de génesis del suelo. ....	13
3.9. Definición de los tepetates. ....	14
3.10. Características de los tepetates T3. ....	14
3.11. Reforestación y rehabilitación de tepetates. ....	15
3.12. Importancia de la dendrocronología. ....	18
3.13. Formación de un anillo de crecimiento anual. ....	19
IV. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO. ....	21
4.1. Localización geográfica. ....	21
4.2. Geología. ....	22
4.3. Relieve y Clima. ....	22
4.4. Suelos. ....	23

Continuación...

4.5. Vegetación. ....	24
V. MATERIALES Y MÉTODOS. ....	25
5.1. Selección de zonas de estudio. ....	25
5.2. Descripción de perfiles de suelo. ....	26
5.3. Recolección de muestras de suelo. ....	26
5.4. Muestreo de núcleos. ....	27
5.5. Niveles de observación utilizados. ....	28
5.6. Análisis físicos y químicos. ....	29
5.7. Análisis micromorfológicos. ....	29
5.8. Medición de conductividad hidráulica. ....	30
5.9. Obtención de cronologías arbóreas. ....	30
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN. ....	32
6.1. Relación de la anchura de anillos de crecimiento con el grado de desarrollo de algunas especies forestales. ....	32
6.2. Relación entre formación y profundidad de horizontes con la pendiente y edad de algunas especies forestales. ....	34
6.3. Relación de propiedades físicas del suelo por especie. ....	47
6.4. Relación de propiedades químicas del suelo por especie. ....	52
6.5. Relación de propiedades micromorfológicas por especie. ....	55
6.6. Estimación de conductividad hidráulica haciendo comparación por especie. ....	63
VII. CONCLUSIONES. ....	65
VIII. LITERATURA CITADA. ....	66
IX. APÉNDICE. ....	78



## ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1 Escalas de observación para el estudio de los Tepetates de la ladera del CerroTláloc... ..	28
Cuadro 2 Edad, formación y profundidad de horizontes, pendiente, formación de suelo por año de cada una de las especies forestales.....	34
Cuadro 3 Propiedades físicas del suelo.....	47
Cuadro 4 Propiedades químicas del suelo por especie.....	52
Cuadro 5 Análisis micromorfológicos del suelo de especies forestales...	57
Cuadro 6 Prueba de T para la plantación en diferentes especies forestales.....	63

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1 Formación del suelo a partir de la roca basal.....	7
Figura 2 Detalle de la zona limite entre el leño temprano y el leño tardío de un corte transversal de Pino. MEB 1500x.....	20
Figura 3 Corte transversal de madera de Pino con menor aumento. MEB 800x.....	20
Figura 4 Ubicación geográfica del área de estudio.....	21
Figura 5 Ubicación y sitios de muestreo en el oriente del Estado de México.....	25
Figura 6 Anillos de crecimiento en especies forestales.....	32
Figura 7 Promedio por especie de acuerdo con la profundidad y la pendiente. ....	51
Figura 8 Promedio por porcentaje de retención de humedad por especie.....	51
Figura 9 Microestructura de las diferentes especies forestales. ....	59
Figura 10 Tipos de excremento presentes en las diferentes especies forestales.....	60
Figura 11 Componentes orgánicos en las diferentes especies forestales.....	61
Figura 12 Componentes orgánicos en las diferentes especies forestales.....	62

## I. INTRODUCCIÓN

En el Valle de México existen zonas muy erosionadas, donde afloran materiales denominados tepetates (Alfaro *et al.*, 1992; Pimentel; 1992), cubriendo una superficie estimada de 30 700 km<sup>2</sup> (Zebrowski *et al.*, 1991; Navarro *et al.*, 2004); los tepetates se caracterizan por su dureza, baja porosidad, limitada actividad biológica y bajo nivel de fertilidad, lo cual demérita o impide su uso agrícola (Pimentel, 1992; Gama-Castro *et al.*, 2007). La erosión del suelo, asociada con el tepetate, es la más severa en las zonas de lomeríos y áreas con pendientes pronunciadas, debido a que no presentan una cubierta vegetal para su protección (Zebrowski, 1992), de ahí que se reporte que los tepetates exceden 800 veces más la pérdida de sedimentos en contraste con un suelo normal de uso forestal (Figueroa, 1975). Ortiz y Cuanalo (1977) estimaron que en el área de influencia de Chapingo, Estado de México, había 2 300 ha de tepetates con alto riesgo de erosión, por lo que se construyeron obras para su recuperación, principalmente relacionados con actividades agrícolas (Camargo y Acosta, 1987; Navarro y Flores, 1997).

Las medidas para la rehabilitación de suelos realizadas por los organismos oficiales se inician con frecuencia con intentos de reforestación, en parte, porque es costumbre considerar a las tierras más degradadas como no aptas para cultivos anuales pero si para el establecimiento de especies forestales. Al respecto, la reforestación se ha practicado en Colombia y en Ecuador, pero sobre todo en México (Zebrowski, 1992).

Para restaurar la vegetación de los lomeríos y subsanar los problemas ambientales del ex lago de Texcoco, en 1973 la Comisión del Lago de Texcoco, inició un programa de conservación del suelo y agua, a través de la reforestación, con la finalidad de controlar el proceso erosivo, evitar las constantes tolveneras y retener agua para propiciar la recarga de acuíferos (Llerena Sánchez, 1992; Pimentel, 1992; Adame y Gómez, 1995).

Adame y Gómez (1995) evaluaron las reforestaciones de la zona oriente y encontraron, que las especies de coníferas con mayor desarrollo fueron *Cupressus lindleyi*, *Pinus montezumae*, *Pinus radiata* y *Pinus michoacana* sobre todo en tepetates rojos. Sin embargo, no se evaluó el grado de desarrollo del suelo y a que velocidad lo están haciendo. Sin suelo no se puede captar y almacenar agua y los escurrimientos

superficiales y erosión impedirán la recarga de los mantos acuíferos (Gama-Castro et al., 2007).

De acuerdo con Brady y Weil (1999) el suelo tiene cinco funciones: es el medio para el crecimiento de las plantas, es el regulador del suministro de agua, actúa como el reciclador de materiales de desecho, es el hábitat de los organismos del suelo, y es el medio ingenieril para la construcción de obras civiles. Cuando un suelo está degradado pierde prácticamente todas sus funciones, por lo que el objetivo de reforestar es tratar de que el suelo vuelva a ser parte del ecosistema. Con la reforestación se inicia con la primera función; sin embargo, se desconoce cuál es el tiempo que requiere una especie forestal para acelerar las siguientes funciones: se sabe que la vegetación tiene influencia directa en la meteorización, estructura y porosidad e indirecta en el almacenamiento y percolación del agua (Porta *et al.*, 2003). Estas intervenciones pueden acelerar la formación del horizonte A en décadas, o casi de inmediato como es el caso del horizonte O (Boul *et al.*, 1983). Sin embargo, son escasos los estudios donde se evalúa el impacto directo de las reforestaciones con diferentes especies en la formación del suelo y por ende en el cumplimiento de sus funciones como parte del ecosistema.

Con base en lo anterior, el objetivo de la investigación fue determinar la evolución de los suelos a través de la formación de horizontes genéticos y propiedades edáficas para establecer el impacto de las especies forestales en la rehabilitación de las funciones del suelo en tepetate rojo.

## II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

### 2.1 Objetivo general

Determinar la evolución de los suelos a través de la formación de horizontes genéticos y propiedades edáficas para establecer el impacto de las especies forestales en la rehabilitación de las funciones del suelo en tepetate rojo.

#### i. Objetivos específicos

Determinar la cronología de especies forestales arbóreas longevas, con base en anillos de crecimiento y su fecha de plantación.

Establecer el efecto de plantaciones de *Eucalyptus*, *Casuarina*, *Pinus montezumae*, *Pinus teocote* y *Cupressus lusitanica*, sobre la formación de horizontes genéticos, las propiedades edáficas

Determinar que especie arbórea es adecuada para la rehabilitación de las funciones del suelo en tepetates rojo

#### b. Hipótesis general

La formación y las propiedades hidrológicas del suelo están en función del tipo de especie forestal arbórea, y por tanto, se obtienen diferentes procesos edáficos.

### **i. Hipótesis específicas**

Las diferentes plantaciones forestales impactan de manera diferencial en la formación de los suelos y captación de agua a partir de tepetates rojos, debido a que algunas son caducifolias, otras perennifolias.

Las plantaciones forestales caducifolias incrementan el contenido de MO, retención de humedad y acidifican al suelo; mientras que las perennifolias sólo retienen agua y acidifican en tepetates rojos.

Las especies nativas (cedros y pinos) forman suelo a mayor velocidad que las especies introducidas (casuarinas y eucaliptos) porque están más adaptadas a las condiciones ambientales locales.

A menor formación de suelo, menor captación de agua.

### III. REVISIÓN DE LITERATURA

#### a. Definición de suelo

El término suelo se deriva de la palabra *solum*, la cual significa piso o superficie de tierra. En general, el suelo se refiere a la superficie suelta de tierra que se distingue de la roca sólida (Foth y Turk, 1980). El Soil Survey Staff, 2010, lo define como un cuerpo natural, constituido por sólidos (minerales y materia orgánica), líquidos y gases, que ocurren en la superficie de la tierra, que ocupa un lugar en el espacio que se caracteriza por: horizontes o capas que se distinguen del material inicial como resultado de las adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones de materia y energía o por la habilidad de soportar plantas enraizadas en un ambiente natural.

#### b. Las funciones del suelo dentro del ecosistema

De acuerdo con Brady y Weil (1999) el suelo ejerce cinco funciones:

- *Medio para el crecimiento de las plantas.* El suelo es un soporte para el crecimiento de las plantas superiores, y proporciona un medio para el crecimiento de las raíces y suministro de nutrientes.
- *Regulador del suministro de agua.* El suelo tiene la función de almacenar, purificar y reciclar el agua.
- *Reciclador de materiales de desecho.* Los suelos tienen la capacidad de reciclar grandes cantidades de basura orgánica transformándola en humus y convirtiendo los nutrientes minerales en formas que se pueden utilizar por plantas y animales.
- *Hábitat para los organismos del suelo.* El suelo contiene billones de organismos que actúan como depredadores, consumidores, productores o parásitos.
- *Medio ingenieril.* Los suelos pueden presentar diferente estabilidad, eso hace que no todos sean aptos para la construcción, por lo que se deben considerar algunas de sus propiedades como dureza, capacidad de carga, comprensibilidad, resistencia y estabilidad; propiedades que varían mucho, más que los materiales de construcción.

Cuando un suelo está degradado pierde prácticamente todas sus funciones, por lo que el objetivo de reforestar es tratar de que el suelo vuelva a ser parte del ecosistema. Con la reforestación se inicia con la primera función; sin embargo, se desconoce el tipo de plantas que pueden acelerar las siguientes funciones. El medio ingenieril no está considerado en el proceso de formación de suelos en esta investigación.

### **c. El suelo como un cuerpo natural**

El suelo es un producto de procesos destructivos y de síntesis en cuya formación son importantes la roca (litósfera), el agua, (hidrósfera), los organismos (biósfera) y el aire (atmósfera). El intemperismo de la roca y la descomposición de los residuos orgánicos por parte de los microorganismos son procesos destructivos; en tanto que, la formación de nuevos minerales y compuestos orgánicos más estables, son procesos de síntesis (Brady y Weil, 1999).

### **d. El perfil del suelo**

Los perfiles de suelos se desarrollan de diferente manera por los efectos de los factores formadores de los suelos. Una roca ígnea, metamórfica o sedimentaria origina horizontes y subhorizontes en un perfil del suelo, pero la profundidad de éstos dependerá de la acción de los siguientes factores: clima, organismos, topografía y naturaleza de la roca a través del tiempo que da la edad de un suelo (Figura 1).

Los estudios cualitativos y cuantitativos de una asociación de suelos indica que suelos de una misma edad varían en sus desarrollos morfogenéticos, de sitio a sitio, por la interacción de los factores formadores de los suelos. Los suelos someros de poca evolución morfogenética son aquellos que tienen delgados horizontes **A**, y le siguen los horizontes **C**, perfil de suelos con horizontes **A-C**. Los suelos más evolucionados son aquellos que desarrollan incipientes horizontes de diagnóstico **B**, o que tienen un **A (B) C** con arcilla iluviada, en ocasiones existen los horizontes nátrico (Na), espódico, argílico y óxico, donde los porcentajes de arcilla son altos. También se usan criterios tomando como base suelos más evolucionados a los horizontes **B** y a los colores de éstos (Aguilera, 1989).



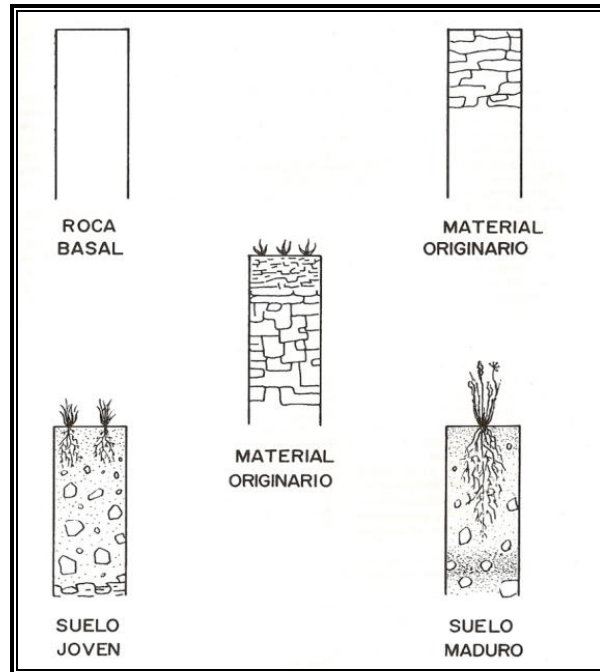


Figura 1. Formación del suelo a partir de la roca basal (Aguilera, 1989).

Las características del suelo ejercen gran influencia sobre la ecología vegetal, edáfica, animal y en el hombre. El suelo es muy complejo y dinámico por lo que estas características y sus efectos sobre las plantas varían, en el espacio, en el tiempo y por las condiciones del medio ambiente (Aguilera, 1989).

#### e. Propiedades edáficas del suelo

Las propiedades edáficas se clasifican como químicas, físicas y biológicas. Dentro de las propiedades químicas se tienen:

*pH*. El cual ejerce influencia en la asimilación y solubilidad de elementos nutritivos y en el tipo de microorganismos y plantas, debido a que cada especie tiene un intervalo de pH idóneo.

*Capacidad de intercambio catiónico*. Esta propiedad del suelo de poder intercambiar iones en la interfase sólido-líquido, y en concreto el tipo y clase de intercambio, tiene grandes repercusiones en el comportamiento del suelo como: controlar la disponibilidad de nutrientes para las plantas ( $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ , entre otros); intervenir en los procesos de floculación-dispersión de las arcillas y por consiguiente en el desarrollo de estructura y estabilidad de los agregados y; determinar el papel del suelo como depurador natural al

permitir la retención de elementos contaminantes incorporados al suelo (Porta *et al.*, 1999).

*Materia orgánica* es importante en el suelo, ya que influye directamente en otras propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Los suaviza; permite una aireación adecuada; aumenta la porosidad y la infiltración de agua, entre otros. Es una fuente importante de nutrientes, a través de los procesos de descomposición con la participación de bacterias y hongos, especialmente. Absorbe nutrientes disponibles, los fija y los pone a disposición de las plantas. Fija especialmente nitrógeno ( $\text{NO}_3$ ,  $\text{NH}_4$ ), fósforo ( $\text{P}_0_4$ ) calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K), sodio (Na) y otros. Mantiene la vida de los organismos del suelo, esenciales para los procesos de renovación del recurso. En consecuencia es esencial para la fertilidad y la buena producción agropecuaria. Los suelos sin materia orgánica son suelos pobres y de características físicas inadecuadas para el crecimiento de las plantas (Buckman y Brady, 1991).

En cuanto a las propiedades físicas son importantes:

La *textura* depende de la proporción de partículas minerales de diverso tamaño presentes en el suelo.

La *estructura* es una propiedad importante para evaluar la calidad del suelo, ya que puede tener una importante influencia biológica a través de agregados esferoidales o bien estar degradado por la presencia de estructuras laminares o primaticas en la superficie **(Lagger y Pape, 1995)**.

La *consistencia* describe a la resistencia para la deformación o ruptura. Según la resistencia el suelo puede ser suelto, suave, duro, muy duro, etc. Esta característica tiene relación con la labranza del suelo y los instrumentos a usarse.

La *densidad* se refiere al peso por volumen del suelo, y está en relación a la porosidad. Un suelo muy poroso será menos denso; un suelo poco poroso será más denso. A mayor contenido de materia orgánica, más poroso y menos denso será el suelo.

La *aireación* se refiere al contenido de aire del suelo y es importante para el abastecimiento de oxígeno, nitrógeno y dióxido de carbono en el suelo. La aireación es crítica en los suelos anegados. Se mejora con la labranza, la rotación de cultivos, el drenaje, y la incorporación de materia orgánica.

La *temperatura* del suelo es importante porque determina la distribución de las plantas e influye en los procesos bióticos y químicos. Cada planta tiene sus requerimientos especiales. Encima de 5°C es posible la germinación.

El *color* del suelo depende de sus componentes y puede usarse como una medida indirecta de ciertas propiedades. El color varía con el contenido de humedad. El color rojo indica contenido de óxidos de fierro y manganeso; el amarillo indica óxidos de fierro hidratado; el blanco y el gris indican presencia de cuarzo, yeso y caolín; y el negro y marrón indican materia orgánica. Cuanto más negro es un suelo, más productivo será, por los beneficios de la materia orgánica.

Como se ha explicado, el suelo es una mezcla de materiales sólidos, líquidos (agua) y gaseosos (aire), en donde su proporción determina a las propiedades físicas o mecánicas del suelo. La adecuada relación entre estos componentes es importante para que crezcan las plantas y sean disponibles los suficientes nutrientes para ellas (Aguilera, 1989).

Otro aspecto importante en la evaluación de la calidad del suelo es la relacionada con la fertilidad, la cual depende de varios factores: disponibilidad de agua, espesor del suelo útil; cantidad de materia orgánica presente; organismos vivos del suelo; capacidad de almacenar las sustancias nutritivas contenidas en el agua

Las plantas para crecer necesitan de nutrientes en proporciones variables para completar su ciclo de vida y para su nutrición. En los ambientes naturales las plantas se adaptan a las condiciones de nutrientes y las diversas formaciones vegetales tienen que ver con la disponibilidad de los mismos. En cambio, en la agricultura moderna se deben emplear técnicas de aporte de nutrientes para garantizar buenas cosechas.

#### **f. Procesos determinantes del balance de agua de suelo**

El conocimiento de la relación de suelo - agua – planta es esencial para el crecimiento de la vegetación, ya que aun en áreas de mucha lluvia, la escasez de agua puede limitar su desarrollo (Porta *et al.* 1999). Esto puede atribuirse a una errática distribución de lluvia, a una alta escorrentía o a una infiltración profunda en suelos con baja capacidad de retención de agua. El agua aplicada al suelo ya sea por lluvia o por riego es determinada

por los procesos de intercepción, escorrentía, infiltración, redistribución y percolación profunda, retención, evaporación y transpiración.

- a. *La intercepción* se refiere al agua interceptada directamente por la cubierta vegetal. Expresadas en términos de porcentaje de la lluvia total, las pérdidas por intercepción se estima que fluctúan entre 15 y 20 %. El porcentaje de intercepción será mayor en aquellos casos donde la vegetación sea abundante y la cantidad de agua en cada aplicación sea baja. El agua interceptada nunca llega al suelo ya que se evapora directamente de la superficie de las plantas.
- b. El *escurrimiento* se puede definir como la proporción de la precipitación que no se infiltra y que se mueve por la superficie del suelo pendiente abajo del terreno. El proceso de escurrimiento depende especialmente de las condiciones y características físicas del suelo y de la cantidad de agua producida por la tormenta. De esta forma cuando llueve en determinada zona hay un periodo inicial (1) en el que el agua es interceptada por los objetos existentes en la zona como arbustos, pastos, árboles y en general todo aquello que impida que el agua llegue al suelo, (2) posteriormente se infiltra en el suelo y (3) llena diferentes depresiones de la superficie. La primera de estas cantidades se llama lluvia interceptada. La segunda capacidad de infiltración que es el máximo volumen de agua que puede absorber un suelo en determinadas condiciones, y la última capacidad de almacenaje por depresión, que posteriormente se puede evaporar o es empleada por la vegetación, o se infiltra en el suelo, pero no origina escurrimiento superficial (Harrold *et al.*, 1974 citado de Rivera, 1996)
- c. La infiltración es un proceso definido como la entrada de agua desde la superficie del suelo hacia el interior del perfil del suelo, determinando la cantidad de agua que va a escurrir y la disponible para las plantas y la recarga del manto acuífero. Aunque infiltración puede involucrar movimiento de agua en el suelo en dos o tres dimensiones, a menudo es tratado como flujo unidireccional en la dirección vertical. El proceso infiltración tiene sus particularidades cuando este se produce bajo riego o precipitación; la velocidad de infiltración puede ser función de: la conductividad hidráulica y el gradiente potencial en la superficie y la tasa de aumento en la entrada total del agua almacenada en el perfil del suelo. Generalmente, la infiltración presenta una elevada tasa inicial que disminuye a través del tiempo durante el evento de lluvia hasta llegar a una menor tasa que es constante (Rivera, 1996).

- d. La *conductividad hidráulica* se define como la velocidad de filtración que se presenta en un medio saturado, dependiendo tanto de las características del suelo como del fluido y se expresa en forma cuantitativa. la velocidad de movimiento de agua en el suelo cuando el agua es sometida a una fuerza neta igual a la gravedad (Herrera, 1977).

En el caso de los tepetates que han aflorado a la superficie presentan una conductividad hidráulica muy lenta, debido a que en su constitución predominan microporos, los cuales tiene baja capacidad de conducir agua. Las prácticas de roturación y manejo que se han realizado en estos suelos, con la finalidad de incorporarlos a la agricultura, han modificado su condición física inicial afectando la conductividad hidráulica (Rugama, 1997).

Diversos estudios realizados en México, sobre el efecto del Sistema de Labranza en la conductividad hidráulica saturada en diferentes unidades de suelo, reportados por Figueroa y Morales (1992) citados de Rugama (1997), en el 58.3% de los casos, la labranza de conservación presentó la mayor tasa de infiltración, lo cual demuestra su importancia ya que permite la creación de poros grandes estables y continuos en el perfil del suelo.

Hay muchos factores que afectan la conductividad hidráulica, como: la porosidad ya que los poros más finos tienen una conductividad más baja que los poros más gruesos (Kohnke, 1972); la estructura (Childs, 1969; Basak, 1972), la arcilla, el contenido de humedad (Rugama, 1997; Baver *et al.*, 1980), la presencia de microorganismos (Allison (1947), citado por Frankerberger *et al.*, (1979), histéresis en el contenido de humedad del suelo ((Hurtado, 1985; Childs, 1969).

El efecto de la estructura del tepetate sobre la infiltración del agua, en estudios realizados por Jeneau *et al.*, (1992) sobre la evolución estructural de la superficie de suelos con tepetate T3, cultivados en surco y con lluvias naturales, determinaron una fuerte disminución de la infiltración debido principalmente a la formación de costras (estructural) superficiales desde las primeras lluvias. Asimismo, se ha reportado que los tepetates presentan principalmente arcillas esmectíticas, halloysita y cristobalita, formando revestimientos arcillosos prominentes en las caras de los agregados (Hidalgo *et al.*, 1992; Gutiérrez *et al.*, 2007), por lo que deben de estar influyendo en el movimiento del agua.

### **g. Factores de génesis del suelo**

La formación del suelo está en relación con los procesos pedogénicos, en donde intervienen flujos de entrada y salida de energía; ejemplos de flujos de entrada son el agua de lluvia o riego y el aire de la atmósfera; y de salida, la evaporación del agua y el aire del suelo y evapotranspiración del agua asociados con dióxido de carbono producidos por la microflora del suelo.

Los factores formadores del suelo son: la roca basal, el clima, los organismos, la topografía y la edad o tiempo, en donde los agentes climáticos y bióticos son factores “forzadores” o agentes activos del sistema, porque aportan materia y energía. Los restantes factores (topografía, roca basal y tiempo) actúan como agentes “reguladores”. Todos en su conjunto, forman el ambiente del sistema (Dokuchaev, 1898; Jenny, 1941, 1958, 1961 y 1980; citados por Foth y Turk, 1980).

Los organismos del suelo presentan alta capacidad para descomponer y/o transformar los residuos vegetales, liberando los elementos químicos o produciendo sustancias húmicas de enorme importancia en la física-química del suelo y en la nutrición mineral de las plantas (Foth y Turk, 1980).

La materia mineral forma la estructura física de los suelos (importa para la circulación y la retención del agua y la aireación del suelo, en permanente interacción con los procesos biogeoquímicos). Aporta nutrientes y bases para la regulación del pH. La transformación por la acción de agentes químicos y biológicos da origen a las arcillas que regulan la textura del suelo y tienen una gran actividad físico-química; los óxidos libres, principalmente hierro, son muy importantes en los suelos tropicales. La gran variedad de rocas ígneas (por su estructura y geoquímica); y sedimentarias (arcillosas, limosas, arenosas) influyen con su textura. Son una de las causas principales de las diferencias de los mismos.

El relieve y drenaje regulan los movimientos de las aguas de escurrimiento superficial y subsuperficial y con ellos se mueven los elementos químicos según su solubilidad (cationes, aniones y compuestos químicos) en un proceso que se denomina Geoquímica del Paisaje y que diferencia las tierras altas de las bajas, reguladas por las condiciones de drenaje. Regula el potencial redox (Foth y Turk, 1980).

El tiempo es un factor de formación de suelo que no está influenciado por otros. El tiempo requerido para que el suelo desarrolle sus diferentes horizontes depende de la interrelación de los demás factores: clima, naturaleza del material parental, organismos y relieve (Gutiérrez *et al.*, 2003).

En condiciones ideales, un suelo se puede formar en 200 años (Donahue *et al.*, 1977; citado de Gutiérrez *et al.*, 2003). El horizonte A se puede formar en una década o dos, un horizonte B incipiente (Bw) de regiones húmedas, en 40 años, un B con cambio de color y estructura en un siglo y un horizonte B de acumulación de arcillas, miles de años. Es por eso que los suelos con pocos horizontes se les denomina jóvenes, en tanto que a mayor diferenciación, más maduro será el suelo, aunque esto también dependerá de la naturaleza del material parental y de las condiciones climáticas (Brady y Weil, 1999).

#### **h. Los procesos de génesis del suelo**

La génesis de suelos se lleva a cabo a través de una serie de cambios específicos, los cuales se pueden agrupar en cuatro procesos (Simonson, 1998):

1. Transformaciones. Cuando los minerales se intemperizan o hay una fragmentación de la materia orgánica, algunos de ellos son destruidos y otros nuevos son sintetizados.
2. Traslocaciones. Movimiento de materiales orgánicos e inorgánicos de un horizonte superior a otro inferior; los materiales se comienzan a mover por acción del agua pero también por los animales.
3. Adiciones, de materiales externos al perfil del suelo, como son materia orgánica a partir de hojas, polvo de la atmósfera, sales solubles del manto freático.
4. Pérdida de materiales del perfil del suelo por lixiviación a través del manto freático, erosión de materiales superficiales, u otras formas de remoción.

Frecuentemente, las transformaciones y la traslocación resultan en una acumulación de materiales en un horizonte en particular. Estos procesos de génesis de suelos, operan bajo la influencia de factores ambientales, por lo que se pueden entender las relaciones entre el suelo, el paisaje y el ecosistema en el que ellos funcionan (Gutiérrez *et al.*, 2003).

### **i. Definición de los tepetates**

Tepetate es un término que tiene un amplio rango semántico en el uso popular y técnico. Deriva del náhuatl *tepétatl*, vocablo compuesto por las raíces *tetl* que significa piedra y *pétlatl*, petate. Literalmente se le ha traducido como “petate de piedra”; “parecido a piedra” o “roca suave”. Para los aztecas, este término estaba contenido en su clasificación de materiales y representaba el taxón de un tipo de suelo agrícola difícil de labrar (Gibson, 1996). En contraste, al arribo de los españoles, el término tepetate fue sinónimo de suelo no agrícola, por su baja calidad (Ortiz- Solorio, 1999, citado por Gama-Castro *et al.*, 2007).

#### **3.10 Características de los tepetates T3.**

Este tipo de tepetates se localizan en las zonas de piedemonte, entre los 2 250 y 2 280 msnm. Se ha calculado que la edad de los tepetates del tipo T3 es mayor de 20 000 años. Algunas características físicas y mineralógicas generales son las siguientes (Peña y Zebroski, 1992, citados de Rivera, 1996):

- a) Pueden contener o no presencia de carbonatos de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), generalmente no presentan carbonatos.
- b) Los tepetates T3 se caracterizan por presentar colores intensos, variando de amarillo a pardo (10YR6/6-7/6), en seco a 7.5 YR4/6-5/6, en húmedo). La presencia de carbonatos de calcio no influye significativamente en la definición de color. Los revestimientos de arcilla, acentúan el color rojizo de estos tepetates y en general no cambian el color en húmedo.
- c) En cuanto a la estructura, generalmente se presentan en bloques y prismas, pero de acuerdo a la presencia o no de carbonatos pueden presentarse como bloques poliédricos y cuadrados cubiertos por láminas sub-horizontales de tepetate. Sin embargo, los estudios muestran que en los tepetates sin la presencia de carbonatos consiste de depósitos consolidados y poco alterados, a tal grado que sólo alcanzan a desarrollar sub-estructuras.
- d) De acuerdo a la consistencia, se muestran duros y muy duros en estado seco. Los tepetates sin carbonatos humedecidos son frágiles, se fragmentan y se



transforman (con las manos) en pastas, en los tepetates con carbonatos esto no es posible.

- e) En general estos tepetates presentan revestimientos de arcilla, tanto dentro de los poros como sobre las caras de sus fragmentos. Estos son más abundantes y más evidentes en aquellos que presentan carbonatos.
- f) La textura de este tipo de tepetates es difícil de determinar cuando se presentan carbonatos, debido a que se disgregan en gránulos firmes, difíciles de romper, pero en los tepetates sin carbonatos se determina con facilidad; generalmente el tepetate T3 es de textura arcillosa.
- g) La densidad aparente varía de 1.23 a 1.55 g/cm<sup>3</sup>, y existe una diferencia en cuanto a la presencia o no de carbonatos, ya que estos últimos presentan valores más altos. En cuanto a la densidad real los valores varían de 2.27 a 2.97 g/cm<sup>3</sup>.
- h) La porosidad total es más elevada en los tepetates sin carbonatos, los valores fluctúan entre el 43 y el 56%; para el caso de los tepetates con presencia de carbonatos los valores van de 41 a 49%.
- i) Los tepetates del tipo T3 se caracterizan por una predominancia de horblenda en los minerales pesados, lo cual permite diferenciarlos con relativa facilidad de los tepetates de la serie T2 que tienen, además de horblenda, hipersteno.

### **3.11 Reforestación y rehabilitación de tepetates**

La rehabilitación agrícola de las formaciones endurecidas resulta necesaria en ciertos países como el Ecuador y México en los que las zonas erosionadas ocupan superficies considerables en áreas densamente pobladas. La reincorporación de zonas erosionadas no es reciente. Se practicaba en la época prehispánica (Hernández, 1987; citado por Zebrowski, 1992) afirma que hace más de 100 años los tlaxcaltecas lograban la recuperación de las zonas con tepetate en dos años, con base en cultivo de haba y ayocote, el primer año, y de maíz, el segundo.

Las medidas para la rehabilitación de suelos tomadas por los organismos oficiales se han iniciado con frecuencia con intentos de reforestación, en parte, porque es costumbre

considerar las tierras más degradadas como no aptas para cultivos anuales pero si para el establecimiento de especies forestales. Al respecto, la reforestación se ha practicado en Colombia y en Ecuador, pero sobre todo en México; numerosas especies han sido puestas a prueba, ya sean latifoliadas, en particular especies rústicas como el Eucalipto (que se adapta perfectamente a las condiciones edáficas de estos suelos erosionados), o coníferas (Zebrowski, 1992).

Algunas experiencias sobre aspectos económicos, agropecuarios y forestales en el Valle de Mezquital, que se tienen en la rehabilitación de estas capas endurecidas en México indican que las prácticas de recuperación de tepetates en zonas que cuentan con irrigación, la inversión se amortiza en 5 años incluyendo subsoleo y labranza de preparación de suelo (Camargo y Acosta, 1987). Estos mismos autores mencionan que en zonas no irrigadas esta práctica es menos rentable.

En estudios de rehabilitación de tepetates con practicas forestales, Pimentel (1992), asegura que los tepetates son capaces de desarrollar vegetación arbórea cuando se les remueve con maquinaria pesada potente, y que los bajos crecimientos que las plantas tienen en estas áreas, se pueden mejorar con especies poco exigentes en elementos nutricionales, siempre y cuando la captación de agua sea suficiente.

Pedraza et al., (1987), como producto del análisis del programa de rehabilitación realizado por la Comisión del Lago de Texcoco, encontraron que el *Pinus radiata* crecía mejor en tepetate gris, que incluso en el suelo, mientras que las Casuarinas y el Eucalipto lo hacían mejor en el tepetate rojo. ( Que variables evaluaron)

Adame y Gómez (1999) cuantificaron las obras de conservación realizadas por el Plan Lago de Texcoco (PLT), en las zonas noreste, oriente y sureste de la vertiente oriental de cuenca de México; además, de que evaluaron las reforestaciones de la zona oriente, de dicha vertiente, bajo diferentes materiales edáficos, determinando que las especies de coníferas con mayor desarrollo fueron *Cupressus lussitanica*, *Pinus montezumae*, *Pinus radiata* y *Pinus michoacana*. La mayor parte de estas especies se desarrollaron mejor sobre tepetates rojos, lo que es muy aceptable con respecto a los otros tipos de sustratos endurecidos.

Al respecto, De la O y Fierros (1987) llevaron a cabo un análisis de costos de reforestación con base en el Proyecto Barrera Forestal de Oriente a cargo de la Secretaria

de Agricultura y Recursos Hidráulicos con el fin de recuperar suelos forestales degradados y restituir la vegetación forestal en esta zona; afirmando a su vez que el Programa de Barrera Forestal de Oriente, es rentable ecológica y socialmente, en virtud de que el empleo de las técnicas de reforestación, ha permitido obtener porcentajes considerables de sobrevivencia en relación con las metas fijadas, según lo demuestran los datos reportados sobre el particular, obteniéndose por consecuencia un aumento proporcional en el nivel de los mantos acuíferos en el área de influencia del Valle de México.

Zamorado (1994), realizó una evaluación del interés que presentan los usufructuarios del bosque respecto a los nuevos programas de reforestación en Texcoco, para que sean ellos los que disfruten los beneficios asociados el recurso forestal, concluyendo a su vez que existe bastante disponibilidad por parte de los ejidatarios para llevar a cabo estos nuevos programas; no así para los comuneros y pequeños propietarios, que mencionan no tener terreno disponible para realizarlos.

Estas experiencias evidencian las posibilidades que ofrecen los tepetates roturados, para solventar los problemas socioeconómicos que tienen las comunidades marginadas que habitan estas áreas, y al mismo tiempo conservar el suelo e incrementar la producción agrícola, pecuaria y forestal.

La roturación es necesaria con el fin de mullir las capas endurecidas; se practica comúnmente por medio de un subsoleo y, posteriormente, de una labranza con el fin de romper los bloques que quedan después del subsoleo (Zebrowski, 1992). Con base en lo anterior, se han hecho diversos estudios de esta índole con la finalidad de encontrar especies que se adapten al tepetate recién roturado (Werner, 1992; Navarro *et al.*, 2004).

Por su parte Werner (1992), en sus experimentos sobre rehabilitación de tepetates concluye que las parcelas que fueron sembradas con maíz después de la roturación fracasaron casi totalmente, debido a un manejo inadecuado del tepetate, no logrando desarrollarse ni una mazorca. No obstante, existe una tendencia a una mayor producción de paja de maíz en el tepetate gris roturado, que en tepetate café roturado, lo que se debe a un mayor almacenamiento de agua en los poros medianos del tepetate gris roturado (>20% en la capa arable).

Además estudios señalan que tanto los cultivos como los pastos se pueden establecer en las formaciones endurecidas después de su roturación agregando cantidades elevadas de

fósforo y sobre todo de materia orgánica (Ávila, 1963; González, 1981; Tovar, 1987; Delgadillo *et al.*, 1989; Caujolle y Luzuriaga, 1986); no obstante, se demostró que las leguminosas no tuvieron éxito (González, 1981).

### **3.12 Importancia de la dendrocronología a nivel internacional**

Los árboles todo el tiempo han estado registrando los cambios de los factores ambientales en los ecosistemas boscosos, tales como: la precipitación, humedad, temperatura, entre otros. Los registros quedan escritos en los anillos de crecimiento de los árboles y las primeras observaciones que relacionaron el ancho de los anillos de los árboles con el clima datan del siglo XV, y fue el propio Leonardo da Vinci quien reconoció la correlación entre las precipitaciones y los anillos anuales (Ceballos, 2002), por lo que con base en lo anterior es considerado como el padre de la dendrocronología (Worbes, 2004).

En la actualidad, esta herramienta se ha aplicado en estudios científicos, prueba de ello son los últimos diez años, en los que países del primer mundo como Canadá, Estados Unidos, Japón, Alemania, Francia e Italia (Martinelli, 2003), han reportado un incremento en el número de publicaciones acerca de las áreas disciplinarias que se encuentran dentro de la misma (Dendroquímica, Dendroecología, Dendrohidrología, Dendroclimatología, Dendrogeomorfología) incluyendo las ambientales (Villanueva *et al.*, 1996; Wiles *et al.*, 1996; Santana, 1999; Biondi, 2001; Iraolagoitia y Ruíz, 2003; Bigler *et al.*, 2004; Creus *et al.*, 2004; González *et al.*, 2005; Díaz *et al.*, 2007).

El concepto dendroecología como área disciplinaria de la dendrocronología fue propuesto por primera vez en 1963 por Vins, para extender la ciencia de la dendroclimatología y la dendrocronología al campo de la ecología forestal (Serre y Tessier, 1989). Esta definición se adentró en las condiciones naturales de los bosques para aplicarse como una herramienta para evaluar la respuesta forestal a los factores ambientales.

Al final de la década de los ochentas Fritts y Swetnam (1986) refinaron este concepto y lo definieron “como una herramienta para evaluar variaciones del pasado y el presente en ambientes forestales”. Esta definición concernía más con los impactos de los cambios anormales del ambiente sobre el crecimiento de los árboles debido a las pestes, contaminación, daño y decline forestales, que los análisis de la influencia de ambientes

normales sobre el crecimiento de los árboles. El campo de aplicación de esta área en el extranjero son más de 30 estudios que han utilizado series de anillos en colaboración con alguna otra disciplina para entender los eventos de disturbios, así como análisis comparativos de eficiencia en los métodos aplicados (Rubio y McCarthy, 2004).

En los últimos diez años, estudios realizados sobre dendroclimatología (Wimmer y Grabner, 2000; Biondi *et al.*, 2001; Díaz *et al.*, 2001; Esper *et al.*, 2003; Rozas, 2004; Xiaoniu *et al.*, 2005; Trouet, *et al.*, 2006) han demostrado con mayor fundamentación que es un área disciplinaria muy útil de la dendrocronología, ya que permite seleccionar y obtener información de carácter climático contenida en la variabilidad de los datos dendrocronológicos, y así poder ver cómo han ido cambiando a través del tiempo, las condiciones climáticas de un sitio en específico.

Las primeras reconstrucciones dendrocronológicas climáticas realizadas específicamente para México son estimaciones de precipitación y del Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI) para el área fronteriza del norte de Sonora (Villanueva, 1996; Villanueva y McPherson, 1996).

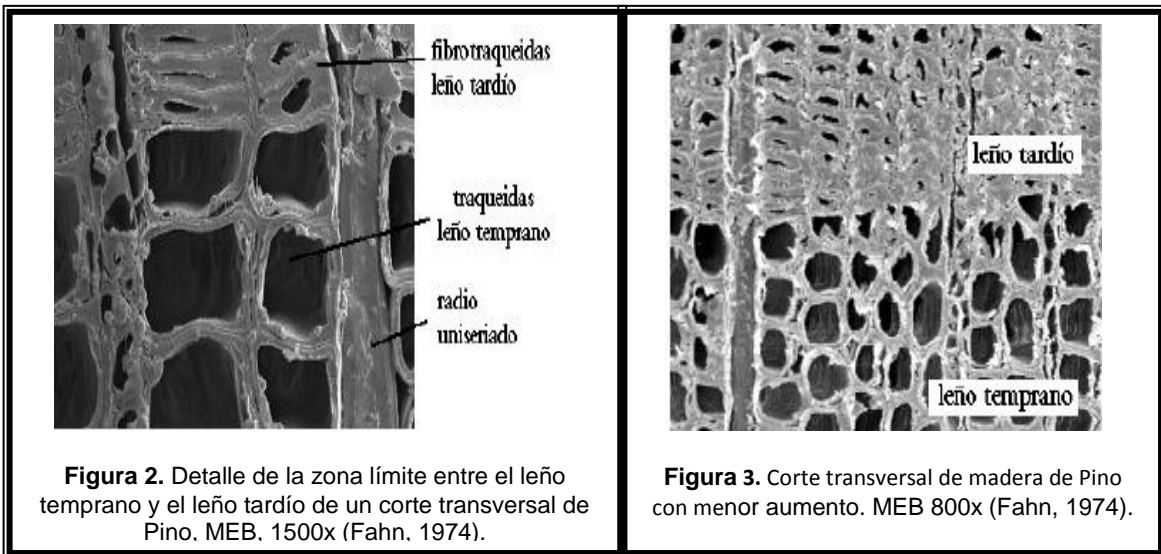
### **3.13 Formación de un anillo de crecimiento anual**

La actividad fisiológica del *cambium* vascular –tejido responsable del crecimiento secundario o crecimiento en grosor de los vegetales- se caracteriza en determinadas especies por ser temporalmente discontinúa y estructurarse en un período de latencia o dormancia, al que sigue otro de actividad en el que se crean nuevas células que se incorporan al fuste de la planta. Este periodo presenta a su vez dos momentos bien diferenciados: uno de plena actividad que da lugar al xilema temprano (células anchas, de paredes poco lignificadas y tonalidad clara) y otro de progresiva ralentización que da la detención a origen al xilema tardío (células estrechas, más lignificadas y de tonalidad más oscura). Ambas bandas de células xilemáticas conforman un anillo de crecimiento (Santana, 1999).

El tejido leñoso está constituido principalmente por traqueidas, elementos imperforados con puntuaciones areoladas. En un anillo de crecimiento se distingue el leño temprano formado por traqueidas, son de mayor diámetro y el leño tardío caracterizado por la

presencia de fibrotraqueidas, de paredes gruesas, lumen reducido y puntuaciones areoladas con abertura interna alargada (figura 2) (Fahn, 1974).

Las traqueidas y fibrotraqueidas miden entre 0.1 a 1 mm de longitud. Los radios medulares son típicamente uniseriados, formados por una hilera de células. Pueden estar constituidos sólo por células parenquimáticas, como en los radios homocelulares, o también por traqueidas cortas, dispuestas en forma horizontal, como en los radios heterocelulares. El área de contacto entre un radio y las traqueidas del sistema vertical se denomina campo de cruzamiento; en tipo de puntuaciones, su número y distribución son caracteres importantes para la identificación de las maderas de Gimnospermas. Cuando presentan un canal resinífero los radios se denominan fusiformes (figura 3) (Fahn, 1974).



#### IV. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

##### a. Localización geográfica

La Cuenca de México se encuentra situada en la parte sur de la altiplanicie mexicana rodeada por montañas que forman parte del eje neovolcánico transversal. Impropiamente se le llama “Valle de México”, ya que este término no se ajusta a la definición de valle, puesto que es una depresión cerrada natural que se abrió artificialmente por el túnel de Tequexquahuac, que recoge las aguas de la cuenca y las arroja en el río de Tula, comprendiendo 8000 km<sup>2</sup> (Valdez, 1970).

Fisiográficamente la cuenca de México puede dividirse en tres subregiones: la parte sur o región de Xochimilco y Chalco, la parte central o región de Texcoco y México, en donde se encuentra la Ciudad capital de la República y la región de los llanos de Apan, situada al noreste (Valdez, 1970).

El área de estudio se localiza en la Cuenca de México, está ubicada en la Vertiente Oriental del Valle de México y comprende la zona de influencia del Proyecto Lago de Texcoco abarcando una superficie aproximada de 144, 180 ha, ubicándose entre los paralelos 19°22'30" y 19°30'00" de latitud norte y los meridianos 98°47'30" y 98°51'15" de longitud oeste (Figura 4) (Llerena y Sánchez, 1992).

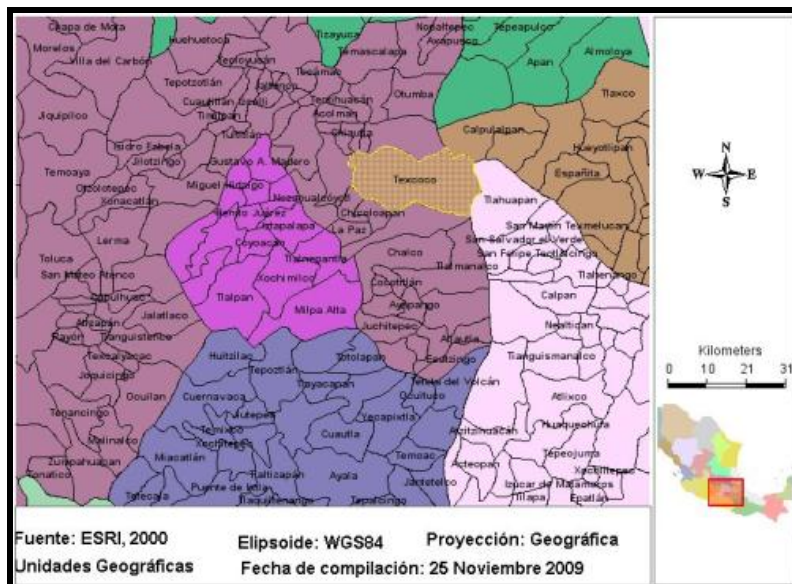


Figura 4. Ubicación geográfica del área de estudio, elaborado por Gabriela R.

## **4.2. Geología**

Según Mooser y Rodríguez (1960) la formación de la cuenca de México data aproximadamente del Terciario Medio, o sea, hace unos 30 millones de años. La región donde se encuentra ubicada ha sufrido desde principios del Terciario la influencia de fuerzas tectónicas de carácter tensional que han producido levantamientos, fracturas y hundimientos de la corteza terrestre, con la consiguiente emisión de grandes cantidades de lavas de distinta índole petrográfica (Ávila, 1963).

En cuanto a la naturaleza de las rocas que componen las diferentes formaciones dentro de la cuenca, se sabe que sólo afloran rocas de tipo volcánico o derivados de ellas, y en cuanto a su constitución petrográfica, se puede asegurar que no es muy variable, ya que está constituida principalmente por andesitas, encontrándose además corrientes lávicas, estratos de toba y brecha, así como de materiales clásticos inter-estratificados depositados por el agua y de naturaleza predominantemente basáltica (Fries, 1960 citado de Valdez, 1970).

## **4.3. Relieve y Clima**

El clima de la Cuenca de México ofrece características muy peculiares a consecuencia de su situación, altitud y topografía. Según García (1968), por la situación de la Cuenca al sur del paralelo 20° norte, se encuentra geográficamente hablando, dentro de la zona tropical, pero su gran altura sobre el nivel del mar (más de 2000 m) le imprime algunas características de los climas templados. Mosiño (1966), señala a tres factores como los responsables de la mayor parte de las características del clima de México, a saber: 1) la orografía, 2) la distribución de las tierras y aguas y, 3) la circulación del aire.

En cuanto a la precipitación existen grandes diferencias de un punto a otro, lo que da lugar a zonas que tienen diversos grados de humedad que originan climas que van de semisecos a subhúmedos (Valdez, 1970). La precipitación anual promedio es de 600 mm con variaciones desde 500 mm en la zona del Ex lago de Texcoco hasta 950 mm en la parte alta (Llerena y Sánchez, 1992). La temperatura media anual varía de 6° a 16°C, y las heladas comúnmente se presentan de noviembre a abril (SAHR, 1990).

En la ladera occidental de la Sierra Nevada, se identifican cuatro zonas topoclimáticas. La primera, del fondo de la cuenca a los 2200 msnm, en la que el clima es  $CwO(w)b(i')$  (el



más seco templado subhúmedo y con lluvias en verano). La segunda, entre 2200 y 2300 msnm, con terrazas aluviales utilizadas como terrenos agrícolas, el clima es  $Cw\ j(w)b(i')$  (intermedio templado subhúmedo con lluvias en el verano). La tercera, entre 2300 y 3000 msnm, los Tepetates soportan suelos someros o afloran a la superficie, el clima es  $CW2(w)bi$  (el más húmedo templado subhúmedo con lluvias en verano). La cuarta arriba de los 3000 msnm, es la zona considerada de montaña, influenciada por la altitud y la precipitación, con clima  $E(T)Chi$  (clima frío) (García, 1968).

El régimen de humedad en la zona es ústico, característico de regiones templadas, con climas subhúmedos o semiáridos, en donde la estación lluviosa es usualmente en la primavera y el verano o en la primavera y el otoño, pero nunca el invierno. El régimen de temperatura es isotérmico, la temperatura media anual del suelo es mayor o igual a 15°C, pero menor que 22°C (Zamorado, 1994).

#### **4.4. Suelos**

La relación entre las geoformas y la presencia de Tepetates en el Valle de México ha sido señalada por varios autores. Nimlos y Ortiz (1987) reportaron tres zonas en donde aparecen Tepetates, la primera, entre 2235 y 2300 msnm, corresponde a un plano lacustre con pendiente menor a dos por ciento, los suelos son Entisoles e Inceptisoles, los Tepetates se presentan a tres metros de profundidad. La segunda, entre 2300 y 2750 msnm, en el piedemonte, los suelos son Molisoles, Inceptisoles y Entisoles, y los Tepetates aparecen tanto aflorando como al interior del perfil. La tercera, de 2750 msnm hasta la cima de la montaña, es la sierra, con pendiente de 20 a 60 por ciento, el Tepetate no existe en esta zona y los suelos son Andisoles. Los tepetates se considera que son capas endurecidas, formadas principalmente por brechas y tobas volcánicas de diferentes colores: tepetate gris, rojo y amarillo (Rey 1979; Zamorado, 1994).

Los principales suelos identificados, de acuerdo a la clasificación FAO-UNESCO utilizada por INEGI, son como sigue: en la parte media Litosoles, Cambisoles húmicos y eútricos y en la parte alta se encuentran Andosoles húmicos y mólicos y diferentes variaciones de Cambisoles. Además estos suelos forman muchas asociaciones, siendo la más común en las zonas con obras de recuperación y reforestación, la de Litosol con Phaeozem (Arias y García, 1992; Llerena y Sánchez, 1992).

Hidalgo *et al.*, (1992) mencionan, que en las vertientes oriental y occidental de las Cuencas de México y Puebla-Tlaxcala, los Tepetates se presentan en cuatro zonas. La primera, en la planicie aluvial entre 2200 y 2250 msnm. La segunda, zona de glaciares entre 2250 a 2400 msnm, con pendiente de 3%, y los suelos son Feozems de acuerdo con la FAO/UNESCO/ISRIC (1988). La tercera, en el piedemonte, en donde los suelos son Cambisoles y la cuarta, en la sierra, en donde no aparecen Tepetates sino sólo Andisoles.

#### **4.5. Vegetación**

En las zonas de tepetates con lomeríos de la parte media, se tiene vegetación herbácea como gramíneas, leguminosas, cactáceas, liliáceas y compuestas; agricultura de temporal, en la parte baja, compuesta principalmente por maíz de temporal, alfalfa, cereales, frijol, cebada y haba. También existen manchones de vegetación forestal de *Pinus* y *Taxodium*. Finalmente, en la parte alta se tienen pastizales y vegetación forestal de *Pinus hartwegii*, *Juniperus deppeana*, *Abies religiosa*, *Eucaliptus sp.* y *Quercus sp.*; y en las zonas erosionadas Agave y Opuntia (Llerena y Sánchez, 1992).

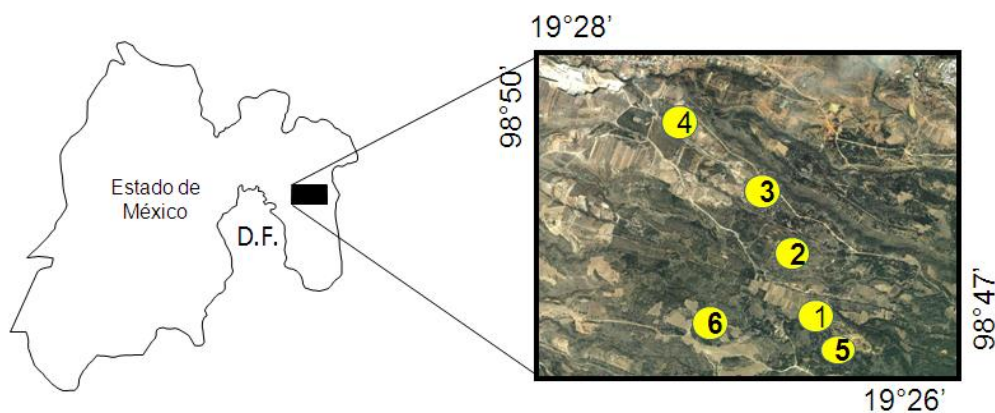
## V. MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1 Selección de zonas de estudio

Se eligió la ladera del Cerro Tláloc, desde Tequexquinahuac hasta Coatlinchán, Estado de México, debido a que esta zona presenta plantaciones monoespecíficas de más de 25 años. Las plantaciones fueron de:

Posteriormente, a través de imágenes satelitales y con ayuda de navegadores como google.maps se ubicaron las diferentes plantaciones forestales y establecer su ubicación espacial. Una vez ubicadas, se realizó una fotointerpretación por medio de la elaboración de un mosaico de vegetación que sirviera de guía para los recorridos en campo.

Una vez elaborado el mosaico de vegetación, se procedió a realizar diferentes recorridos en campo en el mes de enero del año en curso, para poder definir con claridad las áreas reforestadas teniendo como base criterios de selección de especies, es decir, especies que fueran dominantes, homogéneas, que estuvieran en el mismo material parental y a diferente pendiente y por último, que tuvieran apariencia longeva sin daño aparente o deformación en el fuste (bifurcado, ocoteado, quemado o talado) (Stokes y Smiley, 1996), lo que permitiría evaluar la formación del suelo a través de las diferentes plantaciones (Figura 5).



**Figura 5.** Ubicación y sitios de muestreo en el oriente del Estado de México, elaborado por Patricio S. y

Ma. Carmen G.

Se elaboró un transecto en el mosaico de vegetación diseñado de las áreas que cubrieron con los criterios establecidos, que atraviesa Tequexquinahuac - Huexotla y San Miguel Cuatlinchan para poder identificarlas claramente cada vez que se fuera trabajar en campo.

## 5.2 Descripción de perfiles de suelo

Se trabajó con tres especies caducifolias nativas (*Pinus montezumae*, *Pinus teocote* y *Cupressus lusitánica*) y dos perinofolias introducidas (*Eucalyptus melliodora*, *Casuarina equisetifolia* Forst.) debido que cumplieron los criterios de selección. Para cada una de las especies se describieron tres perfiles tomando como base diferente pendiente sobre el terreno, una vez identificada, se delimitaron los perfiles, se detallaron y se hizo su limpieza para resaltar los rasgos naturales del suelo y del Tepetate, cuando éste se presente.

Para describir cada perfil se elaboró un formato que está diseñado en dos partes: descripción del sitio y descripción del perfil. En lo que respecta a la descripción del sitio se tomaron en cuenta los siguientes rubros: número del perfil, quién lo describió, fecha, localización, localidad, elevación, relieve, drenaje superficial del sitio, material parental, flora fauna y condiciones meteorológicas. Para la descripción del perfil se determinó la superficie del suelo, número del estrato y símbolo del horizonte, profundidad, espesor de cada capa, transición a la siguiente capa, humedad, color (seco-húmedo), textura, pedregosidad, estructura (grado de desarrollo), consistencia (seco-húmedo), concentraciones e inclusiones de origen pedogenético (estratos endurecido, cutanes o nódulos), esto solo en caso de haber; poros, permeabilidad, raíces, fauna, reacción al ácido clorhídrico (HCl) y peróxido de hidrogeno ( $H_2O_2$ ), pH y drenaje del perfil. Se enfatizó en la profundidad del suelo, de la formación de horizontes, color, presencia y distribución de raíces, formación de agregados, consistencia y grado de descomposición de la materia orgánica. La descripción se realizó con base en el "Manual para la Descripción de Perfiles de Suelo en el Campo" (Cuanalo, 1975).

## 5.3 Recolección de muestras de suelo

De los sitios seleccionados se colectaron muestras de dos tipos: alteradas y sin alterar.

*Muestras alteradas.* Se tomaron aproximadamente 2 Kg de muestra de suelo de cada capa, además de muestras compuestas para determinar las propiedades físicas y químicas de cada uno de los horizontes del perfil por cada plantación. Cada muestra se guardó en bolsas de polietileno, bien identificada. Las muestras se emplearon para determinar las características físicas, químicas y mineralógicas para determinar el grado de desarrollo de la estructura del suelo, así como su capacidad de almacenamiento de agua.

*Muestras inalteradas.* Se procedió a obtener muestras inalteradas de suelo de la parte superficial para trabajar sección delgada y así obtener análisis micromorfológicos que permitan describir a detalle micro, los componentes orgánicos que constituye al suelo y de esta manera hacer una comparación entre el papel que desempeña en la zona cada especie. Para ello, se emplearon cajas de latón de 10X4X4 cm, dentro de las cuales se tomaron cuidadosamente muestras de suelo para evitar alterar su estructura original. Una vez obtenidos los bloques, se identificaron y se marcó la orientación de éstos en el perfil. Mediante la observación micromorfológica se determinó la estructura, tipo y distribución de poros, grado de descomposición de la materia orgánica, patrones relacionados entre las raíces y la formación de agregados.

#### **5.4 Muestreo de núcleos**

*Edad de los árboles.* Se seleccionaron de manera aleatoria árboles que tuvieran la mayor apariencia longeva en el área de estudio, con la finalidad de obtener cronologías lo más grande posibles; para ello, se utilizó un taladro Pressler de 40 cm de longitud y 5 mm de diámetro que se colocó en lo que se cree puede ser la médula (centro del árbol). Se ubicó el área de extracción en el plano perpendicular a la pendiente del sitio para obtener el núcleo (por medio del taladro) y se presionó firmemente contra la corteza, colocado en un ángulo recto ( $90^0$ ) girando el mango en el sentido de las manecillas del reloj a la altura del pecho (1.35 m)(Grissino-Mayer, 2003 citado de Villanueva y Cerano, 2004), el núcleo obtenido se colocó en un popote de plástico, etiquetado con sus respectivos datos y fue nombrado Núcleo A, se efectuó el mismo procedimiento en la cara contraria del tronco para obtener el Núcleo B.

La perforación realizada por el barrenamiento fue sellada con cilindros de madera, previamente impregnados en una solución antiséptica de formol/alcohol 1:10 para evitar al árbol una invasión por hongos o insectos y para promover su compartimentalización. Todos los popotes se colocaron en una caja para transportarlos al laboratorio.

Finalmente, se colectaron ramas con cono (en caso de tenerlos) de cada especie seleccionada de manera homogénea en el área de muestreo por cada sitio para su identificación taxonómica.

### **5.5 Niveles de observación utilizados**

Los niveles de observación que se utilizaron para este estudio, se presentan en el Cuadro 1, así como las técnicas utilizadas y el tipo de actividad realizada para cada nivel.

**Cuadro 1.** Escalas de observación para el estudio de los Tepetates de la ladera del CerroTlálóc.

NIVEL	ESCALA	TÉCNICA	ACTIVIDAD
Paisaje/catena	Km/m	Ubicación del área de estudio con imágenes satelitales.	Elección de los sitios de muestreo, Ubicación de los sitios de muestreo dentro de las imágenes satelitales. Elaboración de un mosaico de vegetación. Elaboración de croquis del relieve y transecto.
Perfil	m/cm	Excavación y descripción macromorfológica del perfil.	Muestreo por horizonte o capa de muestras alteradas e inalteradas.
Horizonte o capa	mm/μm	Micromorfología (observación de láminas delgadas).	Impregnación con resina poliéster insaturada de las muestras inalteradas y corte de una sección para elaborar la lámina delgada. Separación mecánica de la fracción arenosa y separación de minerales ligeros y pesados.

## 5.6 Análisis físicos y químicos

Se determinaron las propiedades y características físicas y químicas de cada horizonte o capa necesarias para su clasificación. Los análisis efectuados fueron: textura, densidad aparente (Dap), pH en agua relación 1:1, carbono orgánico (C.O.), Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), porcentaje de saturación de bases (PSB), retención de humedad; así como el color en seco y en húmedo empleando para ello la carta de colores Munsell. Todos los análisis anteriores están descritos en el Manual para Análisis de Suelos de van Reeuwijk (2003).

## 5.7 Análisis micromorfológico

Para efectuar la caracterización micromorfológica de los tepetates, se realizaron secciones delgadas y se analizaron bajo el microscopio petrográfico con el método de Murphy (1986):

El proceso de preparación de las láminas delgadas consistió en tres etapas:

a. *Proceso de impregnación:* Las muestras se sacaron al aire durante 24 horas; luego se colocaron en un recipiente previamente cubierto con aluminio. Se le agregó una mezcla de resina HU543 y acetona, en una relación 1:1, se añadió después unas gotas de catalizador y acelerador. Las muestras se colocaron en un aparato de impregnación con una presión de 25 a 27 pulgadas de mercurio por un tiempo de aproximadamente 30 minutos. Finalmente, se colocaron las muestras en una estufa bajo un régimen de temperaturas que va de 30 °C por 12 h, 50 °C por 3 ó 4 h, 70 °C por 3 h, 90 °C por 2 h y 100 °C por 1 h.

b. *Preparación de bloques.* Una vez impregnadas las muestras con resina las muestras se cortaron. El tamaño de los bloques fue de 28 a 48 mm, después, los bloques se pulieron en una de sus superficies con una pulidora giratoria, utilizando lijas de óxido de aluminio y diamante cada vez más finos hasta obtener una superficie bien pulida.

c. *Preparación de láminas delgadas.* Para fijar las muestras de tepetates en el portaobjetos, se usó la misma mezcla de resina con catalizador y acelerador que se utilizó

en la impregnación. Se pulió la muestra hasta alcanzar un espesor de 30 micras aproximadamente; después, los pulimentos fueron cubiertos con un portaobjetos (Gutiérrez, 1988).

d. *Descripción de los Microconstituyentes.* Para la descripción de las secciones delgadas se emplearon los métodos propuestos por Bullock *et al.* (1985) y Stopps (2003), que consisten principalmente en la descripción de algunos microconstituyentes del suelo, específicamente poros, agregados, distribución de raíces y grado de descomposición de la materia orgánica.

### **5.8 Medición de conductividad hidráulica**

Se utilizó un Permeámetro Guelph (Soil moisture Equipment Corp: 2800K1), con la finalidad de medir la conductividad hidráulica en tepetate que en este caso se utilizó como testigo para poder compararlo con cada perfil de suelo por especie, con base en la metodología propuesta por Reynolds y Elrick (1985).

### **5.9 Obtención de cronologías arbóreas**

a. *Secado, montado, identificación y pulido.* Se colocaron los popotes con las muestras en una estufa Kimet, durante 2 días a 40°C, para secar los núcleos y evitar la invasión de hongos y/o bacterias por humedad. Para la manipulación de los núcleos de crecimiento en el Laboratorio, fue necesario utilizar guantes esterilizados para evitar la contaminación de los mismos.

Posteriormente, las muestras se trasvasaron a bastidores de madera de 40 cm de longitud, con un canal de 5 mm de ancho y 2 mm de profundidad previamente etiquetados, y se procedió a orientar, dejando expuesta la cara transversal del núcleo que reflejó la luz; se adhirió firmemente al bastidor con pegamento especial para madera. Una vez seco, se recortó la cara expuesta con una navaja de acero inoxidable, obteniendo una superficie plana, y posteriormente se afinaron cada una de las muestras de las zonas de estudio con lijas para madera de diferente medida (80, 180, 400) para facilitar la observación de los anillos.

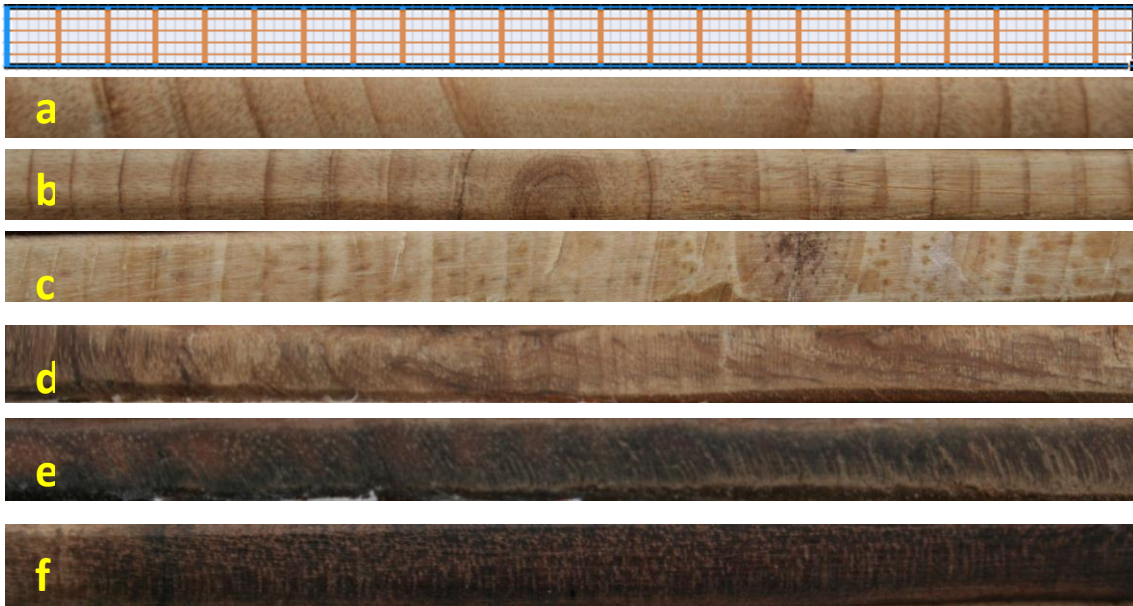
b. *Marcaje y Conteo de Anillos.* Se adhirió papel milimétrico en una pared del bastidor para marcar cada cinco años su cronología y con un estereoscopio MOTIC modelo



DMW143 y resolución 4X, para poder visualizar a detalle los anillos de crecimiento; de esta manera podemos datar cada sector del tronco y por lo tanto asignar fechas absolutas a los fenómenos que observamos en la madera. La fecha de formación de cada anillo puede establecerse comenzando desde el centro hasta la corteza del árbol y asignando al último anillo la fecha del año presente, siguiendo la metodología de *Stahle et al.* 2000 citado de *Díaz et al.* 2002. Posteriormente, se marcaron los anillos visibles o bien se agregaron unas gotas de agua desionizada a lo largo del núcleo para clarificar los anillos y así poder observar con mayor confiabilidad las anomalías encontradas en las muestras (anillos falsos, falsos múltiples, difusos, difusos múltiples y suprimidos) (*Kuo and McGinnes*, 1973; *Santana*, 1999; *Fritss*, 1976 citado de *Copenheaver et al.*, 2006) por cada especie (2 individuos de cada especie fueron analizados), y así evitar errores en la determinación de la edad de las especies.

## VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1 Relación de la anchura de anillos de crecimiento con el grado de desarrollo de algunas especies forestales en el sitio de estudio.



**Figura 6.** Anillos de crecimiento en especies forestales: **a)** y **b)** *Cupressus lusitanica*, **c)** *Pinus montezumae*, **d)** *Pinus patula*, **e)** *Eucalyptus alobulus* v. **f)** *Casuarina equisetifolia*.

Los árboles todo el tiempo registran los cambios de los factores tales como: precipitación, humedad, temperatura, entre otros. Los registros quedan escritos en los anillos de crecimiento de los árboles.

En la Figura 6 se puede observar la expresión de anillos de crecimiento en *Cupressus lusitánica*, *Pinus montezumae* y *Pinus teocote*, reflejando a su vez las condiciones de desarrollo de las especies en el sitio de estudio; esto se deduce con base en la anchura de los anillos de crecimiento, ya que se muestran anchuras prominentes, principalmente en *Cupressus lusitanica*; y sobre todo, por ser especies de bosque con clima templado, debido a lo anterior, tienen periodos de sequía y precipitación durante un periodo determinado, lo que provoca el marcaje de la madera temprana (crecimiento de

primavera) y de la madera tardía (crecimiento de verano) (Ceballos, 2002; Ayala *et al.*, 2006).

Ceballos (2002) menciona que el clima en particular, a través del flujo evapotranspiracional, es uno de los factores que más fuertemente afecta el crecimiento de los árboles. En los años en que la cantidad de precipitaciones y las temperaturas son adecuadas, el árbol crece relativamente más y el anillo correspondiente será relativamente más ancho. A la inversa, en los años en que el clima es particularmente severo, el árbol crece menos, produciendo anillos estrechos. Si se mide el ancho de los anillos se tendrá una serie que representará de alguna manera el comportamiento del clima en la zona.

Sin embargo, existen condiciones adversas en el sitio que pueden afectar el crecimiento de los anillos de los árboles como: 1) la radiación solar (la intercepción de la radiación solar, condiciones adecuadas de luz, fotocontrol de la respuesta vegetal); 2) la temperatura (en la superficie del suelo, dentro del bosque, fríos invernales y reanudación del crecimiento), 3) humedad atmosférica, 4) viento, 5) clima (regiones de alta y de mínima precipitación) y, 6) suelo (drenaje, profundidad y suministro de nutrientes) (Schweingruber, 1993).

*Con respecto a Eucalyptus globulus y Casuarina equisetifolia*, no se pudieron observar a simple vista sus anillos de crecimiento. Esto se debe principalmente a dos razones: 1) son especies tropicales de origen australiano y, 2) presentan sus anillos gran cantidad de lignina, la cual es una proteína que oscurece la madera (Evans, 1989; Montoya, 1995; Wheeler *et al.*, 1995, citado de Aguilar y Barajas, 2005; Martínez *et al.*, 2006).

En las zonas tropicales húmedas la actividad cambial generalmente es continua a lo largo de todo el año, por lo que la mayoría de las especies no forman anillos de crecimiento evidentes, o desarrollarlos de manera inconspicua, como sucede en climas donde la estacionalidad no es muy marcada (Wheeler *et al.*, 1995, citado de Aguilar y Barajas, 2005).

Worbes (2004) menciona que hay tres tipos diferentes de estacionalidad climática que afectan el crecimiento anual de los árboles, principalmente en los trópicos: 1) la variación de la temperatura anual, con temperaturas cerca o por debajo del punto de congelación en invierno; 2) inundaciones anuales de los grandes sistemas riparios en los trópicos,

elevándose sobre los cinco metros del piso forestal durante seis o más meses por año causando condiciones anóxicas en el suelo, la respiración y la toma de agua es impedida; muchas especies tiran sus hojas y presentan dormancia cambial. Esto se refleja a través de los anillos anuales en la madera y por último, 3) las variaciones de la precipitación entre temporadas de lluvia y temporada de sequía. Sin embargo, en los bosques templados aún no se tienen datos precisos de qué factores ambientales los afectan.

## 6.2. Relación entre formación y profundidad de horizontes con la pendiente y edad de algunas especies forestales arbóreas

En el Cuadro 2 se reportan resultados correspondientes de la edad, número de perfil, distribución de horizontes, profundidad, pendiente, centímetros de suelo por año y promedio por año de las diferentes especies forestales.

**Cuadro 2.** Edad, formación y profundidad de horizontes, pendiente, formación de suelo por año de cada una de las especies forestales.

Especie	Edad	Símbolo del horizonte	Prof. (cm)	Pendiente (%)	cm por año	Prom. por año	
<i>E.globulus</i>	37 años (1973-2010)	Oi	8-0	3	1,73	1,43	
		A	0-13				
		Bw	13-30				
				Bw <sub>2</sub>	30-56	5	1,43
				Oi	6-0		
				Bw	0-9		
				Bw <sub>2</sub>	9-36	15	1,14
				Bw <sub>3</sub>	36-47		
				Oi	1-0		
				Bw	0-14	1	0,86
		Bw <sub>2</sub>	14-26				
		Bw <sub>3</sub>	26-41				
<i>C. equisetifolia</i>	37 años (1973-2010)	Oi	5-0	2	1,51	1,35	
		A	0-6				
		Bw	6-16				
				Bw <sub>2</sub>	16-27	8	0,85
				Oi	4.5-0		
				A	0-6.5		
				A <sub>2</sub>	6.5-28.5	12	1,68
				C	28.5-51.5		
				Oi	5-0		
				A	0-8	22	0,67
		A <sub>2</sub>	8-14				
		Bw	14-23				
		Bw <sub>2</sub>	23-36	28	1,44		
		Bw <sub>3</sub>	36-57				
		Oi	2-0				
<i>P. montezumae</i>	27 años (1983-2010)	Ac	0-17	8	0,85	0,99	
		2C	17-21				
		Oi	2-0				
				Bw	0-8	22	0,67
				C	8-16		
				Oi	2-0		

Continuación....						
		A	0-21			
		AC	21-37			
<i>P. teocote</i>		Oi	2-0	1	0,68	0,61
		A	0-15			
	25 años (1985- 2010)	Oi	0,5-0	10	0,46	
		AC	0-6,5			
		Oi	3-0	27	0,68	
		A	0-14			
<i>C. lusitánica</i>		Oi	2-0	8	0,61	1,22
		A	0-10			
		C	10-18			
		Oi	2-0	23	1,39	
		A	0-3			
	33 años (1977- 2010)	A <sub>2</sub>	3-24			
		C	24-44			
		Oi	5-0	2	2,48	
		A	0-35			
		AC	35-77			
		Oi	1-0	8	0,39	
		AC	0-12			

### 6.2.1 Edad de cada especie forestal

La obtención de la edad con base en la expresión de anillos de crecimiento es la siguiente: *Cupressus lusitanica*, *Pinus montezumae* y *Pinus teocote*, tienen entre 33, 27 y 25 años, por estar bien definidas las áreas de madera temprana (crecimiento de primavera) y madera tardía (crecimiento de verano) en cada anillo de crecimiento. Estos factores permitieron definir la edad de cada especie, sobre todo en *Cupressus lindely*. De manera parecida (aunque menos evidente), se encuentran *Pinus montezumae* y *Pinus teocote*, puesto que se pueden aún visualizar sus anillos de crecimiento.

Sin embargo, se tuvieron inconvenientes en la metodología, puesto que en su cronología se tiene anillos falsos, los cuales se pueden llegar a confundir con un anillo verdadero, para ello se requirió tener conocimiento sobre estas anomalías, es decir, saber identificarlos (Kuo and McGinnes, 1973; Santana, 1999; S.E.C.F., 2005; Fritts, 1976 citado de Copenheaver *et al.*, 2006).

En bosques templados los anillos están bien definidos por células de mayor tamaño en la madera temprana y de menor tamaño en la madera tardía (Ayala *et al.*, 2006). Sin embargo, condiciones severas de sequía o años de intensa radiación solar, pueden provocar la presencia de falsos anillos de crecimiento en algunas especies (Gourlay, 1995), o en algunos casos, difusos (Aguilar y Barajas, 2005). La tendencia y estacionalidad de los anillos falsos inducidos por la sequia varía a lo largo de los sitios y de las especies (Priya and Bhat, 1998; Wimmer *et al.*, 2000; Treter *et al.*, 2002; Masiokas y Villalba, 2004; Bouriaud *et al.*, 2005).

Los anillos de crecimiento es un carácter complejo ampliamente estudiado pero aún no totalmente aclarado (Panshin y de Zeeuw 1970; Metcalfe y Chalk, 1989); ha sido utilizado para la interpretación del clima (Fritts, 1976; Wimmer y Grabner, 2000) al ser afectados por cambios ambientales drásticos como sequía y heladas (Wimmer y Grabner, 2000).

Por consiguiente, es difícil deducir la información climática específica intraestacional a partir de los registros de la anchura de los anillos (Fritts 1976). Una excepción aparece cuando las condiciones inusuales interrumpen los patrones de crecimiento normal, produciendo variaciones distintas en la aparición de los anillos anuales. Dichos ejemplos incluyen los anillos solidificados (La Marche and Hirschboeck 1984; Stahle 1990; Brunstein 1996), anillos ligeros (Filion *et al.* 1986; Volney and Mallet 1992; Yamaguchi *et al.* 1993; Szeicz 1996; Liang *et al.* 1997) y el desarrollo de bandas intra-anales (Wimmer y Grabner, 2000; Cherubini *et al.*, 2003).

Las especies en las que no se pudo establecer su edad, fueron *Eucalyptus globulus* y *Casuarina equisetifolia*, por no presentar anillos bien diferenciados evidentemente, por lo que fue necesario recurrir al programa de reforestación del proyecto lago Texcoco (SAHR, 1990), de donde se obtuvo la edad de la plantación, correspondiendo que *E. globulus* fue plantado en 1973, al igual que *Casuarina equisetifolia*.

### **6.2.2 Relación entre formación de horizontes genéticos, edad y pendiente de las especies forestales**

Se encontró que las especies forestales influyen de diferente manera en la formación de suelos y desarrollo de horizontes genéticos a pesar de que la mayoría de ellos tienen aproximadamente la misma edad (entre 25 y 37 años).

Las especies forestales como *Eucalyptus globulus* y *Casuarina equisetifolia* son las que están formando más suelo (1.43 y 1.35 cm por año en promedio), a diferencia de *Pinus montezumae* y *Pinus teocote* (0.6 y 0.9 cm por año en promedio). Se atribuye a que estas especies son caducifolias tiran sus hojas, las cuales por presentar mayor cantidad de lignina y compuestos orgánicos de aceites y terpenos anillos ciclicos, presentan menor descomposición (Cita Dynamic of litter ) y por lo tanto mayor acumulación de MO.

En cuanto a la pendiente se encontró que no está influyendo en la acumulación de materiales entre la misma y entre diferentes especies forestales, puesto que se encontraron perfiles tanto profundos como someros tanto en pendientes ligera y pronunciada. Esto no coincide con diversos autores quienes mencionan que entre los factores formadores de suelos, se encuentra la pendiente, en donde los suelos que se desarrollan sobre éstas, son más profundos, sólo cuando son ligeras (Buol *et al.*, 1998; Porta *et al.*, 1999; Gutiérrez *et al.*, 2003).

Todas las especies utilizadas en las plantaciones están formando horizonte Oi (materiales orgánicos, poco descompuestos) aproximadamente entre los primeros 2-8 cm, donde si se encontró diferencias es en la formación del horizonte A; algunas de ellas como la *Casuarina equisetifolia* y *Cupressus lusitanica* no solamente tienden a desarrollar este horizonte mayor, sino también subdivisiones, por la presencia mas abundante de raíces. Caso contrario ocurre con los *Pinus* y el *Eucalyptus globulus* donde su influencia es mínima. Los horizontes Bw, son los originales que afloraron a la superficie por procesos de erosión y que han sido modificados en su superficie de acuerdo con las especies forestales, por eso es que *Eucalyptus globulus* los presenta prácticamente en la superficie. Finalmente, se tienen los horizontes C o transiciones AC, que ocurren en los *Pinus* que tienen poca influencia en la formación de suelos.

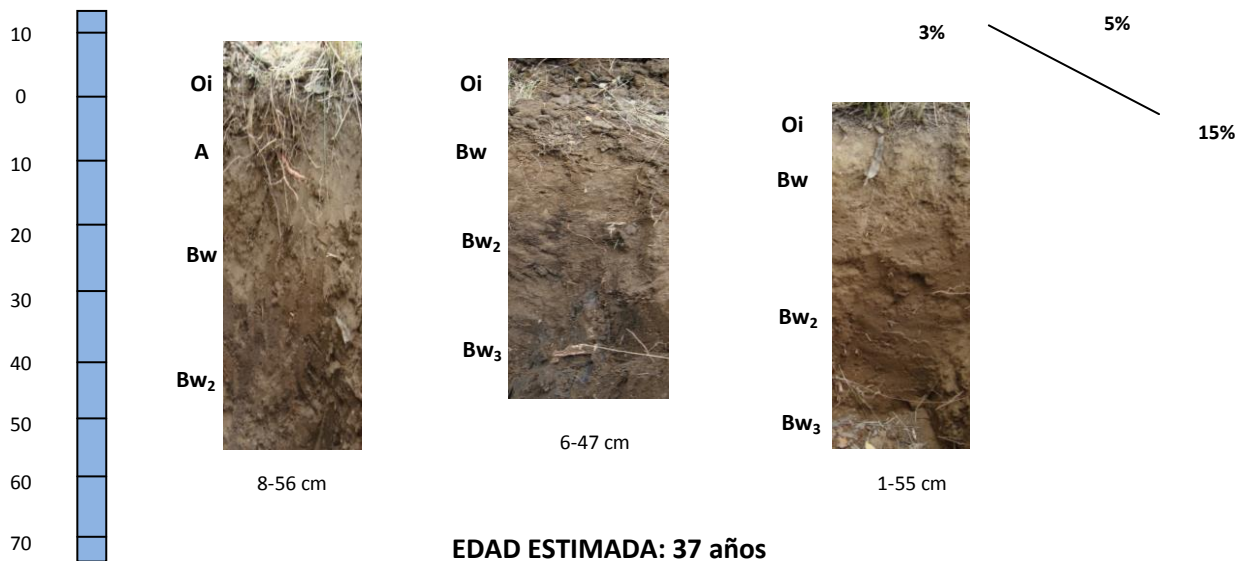
En cuanto al espesor del horizonte A, las especies forestales difieren también en el tiempo de formación (de 6 a 35 cm, *Eucalyptus globulus* y *Cupressus lusitanica*, respectivamente). De acuerdo con Brady y Weil (1999), el Horizonte A se puede formar en una o dos décadas, siempre que los factores de formación sean favorables, en este caso la acumulación de materia orgánica del suelo, lo que produce el oscurecimiento del suelo y la acumulación de raíces aun nivel, ya sea considerable o no. Según la Soil Survey Taxonomy (2010), *es un horizonte mineral formado en la superficie (o por debajo de un horizonte O), que carecen total o parcialmente de la estructura original de la roca parental y que poseen uno o más de los siguientes atributos: 1) una acumulación de materia orgánica humificada, íntimamente mezclada con la fracción mineral y que no posee características dominantes de los horizonte B y E, o 2) propiedades que resultan del laboreo, el pastoreo u otras perturbaciones similares.* En cambio, el horizonte B incipiente que llegar a ser discernible en regiones húmedas y llegar a formarse aproximadamente en 40 años (Brady y Weil, 1999); al respecto de éste, la Soil Survey Taxonomy (2010) lo determina por ser *un horizonte formado por*

debajo de un horizonte O, A o E, total o casi totalmente desprovisto de estructura de roca y que posee uno o más de los siguientes atributos: 1) concentración iluvial de arcilla, hierro, aluminio, humus, carbonatos, yeso, o sílice, solos o en combinación; 2) evidencia de eliminación de carbonatos; 3) concentración residual de sesquióxidos; 4) revestimientos de sesquióxidos que hacen que el horizonte posea visiblemente pureza menor, intensidad mayor o matiz más rojo que los horizontes subyacentes y suprayacentes, sin iluviación aparente de hierro; 5) alteración que forma arcillas silicatadas, libera óxidos o ambos y que forma estructura de suelo (prismas, bloques, gránulos) si los cambios en el contenido de humedad están acompañados por cambios de volumen; o 6) fragilidad.

Todos los tipos de horizonte B son subsuperficiales o lo fueron originalmente, aunque luego hayan quedado expuestos en la superficie por erosión de los horizontes superiores. No se consideran en cambio, horizontes B, las capas en donde existen películas de arcilla en forma de revestimientos sobre fragmentos de roca o de estratificaciones finas en sedimentos, o donde se observa gleización, pero no otros cambios edafogénicos (Soil Survey Taxonomy, 2010)

A continuación se describen cada una de ellas:

### 6.2.1 Eucalipto (*Eucalyptus globulus*).





*Eucalyptus globulus* es una especie que forma un horizonte A cuando se desarrolla en pendiente suave, siendo más profundo y un espesor de *litter* mayor; en contraparte, no se forma este horizonte A, a medida que la pendiente se incrementa.

Esto se debe principalmente, tal como lo señalan Gutiérrez *et al.* (2003), por lo general, los suelos sobre pendientes ligeras, cuentan con más agua que pasa a través de ellos, son más profundos, la vegetación es más exuberante y tienen mayores contenidos de materia orgánica, en comparación con los suelos de pendientes pronunciadas.

Las plantaciones tienen 37 años (SAHR, 1990), los cuales, reflejan que la formación de suelo sobre tepetate rojo (toba andesítica) ha sido exitosa en el sentido de que está formando en promedio 1.73 cm por año de suelo en pendientes suaves, aunque con mínima diferencia en relación a pendientes pronunciadas (1.14 cm de suelo). A pesar de lo anterior, en muchos países el establecimiento de plantaciones forestales introducidas, como en el caso del eucalipto, ha sido poco aceptada social y ecológicamente debido a la controversia que ha generado su establecimiento, sobre todo con relación al impacto ambiental que éstos generan, aunque son escasos los estudios que sustentan estas aseveraciones; sin embargo, debido a las características como ser una especie perenne, es decir, siempre mantiene el follaje, caracterizada por su rápido crecimiento (razón por la cual es uno de los géneros botánicos exóticos más conocidos y cultivados a nivel mundial), alta adaptabilidad, y a la calidad de sus fibras y su celulosa se ha venido utilizando como la materia prima por excelencia de la actividad forestal, sobre todo en áreas tropicales (FAO, 1990; Ceccon *et al.*, 1999; Martínez *et al.*, 2006).

Las plantaciones forestales, independientemente si se establecen con fines comerciales o de rehabilitación, pueden desempeñar varias funciones en el ecosistema. En los lugares donde se han establecido con fines de rehabilitación del medio ambiente, ayudan a la conservación del suelo y agua (Grubb, 1995).

Algunos aspectos sobre los que se han encontrado evidencias incluyen:

a) *Fertilidad de suelos*. Las altas tasas de crecimiento y rotaciones cortas de mayoría de las plantaciones del Eucalipto traen por consecuencia la captura y la exportación de grandes cantidades de nutrientes del suelo (Ceccon *et al.*, 1999); y se les atribuye la acidificación y empobrecimiento de los suelos, sin embargo, cuando éstos no están

sujetos a aprovechamiento demuestran mejorar el suelo o ser neutros, no existiendo pruebas de que contribuyan a degradar el terreno en ningún caso (Montoya, 1995). Un estudio realizado por Cavelier y Santos (1999), citado por Oros (2008) demuestra que las plantaciones tienen un efecto sobre el suelo entre el horizonte orgánico debido a la acumulación de hojas y/o raíces finas, sin embargo, se sugiere que el efecto de éstos no son sólo producto de la especie plantada, sino más bien una parte, se ha propuesto que el eucalipto mejora la fertilidad del suelo en el largo plazo (Ricardo y Madeira (1985), citado por Oros (2008); Ceccon *et al.*, 1999). Otros estudios realizados mostraron que el suelo de plantaciones de 25 años de edad de *E. Citriodora* y *E. paniculata*, contenía más de dos veces la cantidad de mantillo que la vegetación nativa, así también se tenían más microorganismos y nutrientes (Ceccon *et al.*, 1999). En los arenales costeros de Huelva (España) las zonas plantadas con eucaliptos han mejorado notablemente los suelos, ya que contienen una mayor cantidad de nutrientes y materia orgánica cuando se comparan con otras zonas aledañas deforestadas (Montoya, 1995).

b) *Protección de suelos.* Las diferentes especies de eucalipto se han utilizado para evitar la erosión eólica en zonas de dunas en España, así como rompevientos en la agricultura, principalmente por ser una especie de rápido crecimiento, por la dureza de su madera y un extenso sistema radical (contribuye a perforar las capas más impermeables y permitir un drenaje vertical), así como por su protección contra el viento (Montoya, 1995). Muchos eucaliptos tienen la capacidad crecer en suelos bajos en nutrimentos, sin embargo, en condiciones de fertilidad del suelo adecuadas y altos niveles de nitrógeno y fósforo, tienen un incremento en la tasa de crecimiento; no obstante, esto depende de la respuesta de cada especie. Aunque cabe destacar que pocos eucaliptos pueden tolerar altos niveles de salinidad en el suelo (Turnbull y Pryor, 1989).

c) *Agua.* A las plantaciones de eucalipto en áreas cercanas a centros de distribución se les atribuye la desecación de éstas, además de dañar los conductos de agua (Ceccon *et al.*, 1999), debido a que es una especie de rápido crecimiento, por lo que consume grandes cantidades de agua si tiene acceso a ella (Montoya, 1995). Por otro lado, se considera que el efecto más importante es la intercepción del agua de lluvia, la cual puede considerarse como una fracción de ésta que retorna a la atmósfera sin alcanzar el manto freático (Lima, 1993, citado por Oros, 2008), sin embargo, se ha encontrado que la cantidad de agua interceptada en las plantaciones es equivalente a la de otros tipos de

bosques nativos (Ceccon *et al.*, 1999). En cuanto a la extracción de agua por el sistema radical, los estudios mencionan que al igual que muchos bosques nativos, en las plantaciones de eucalipto las raíces se concentran en las capas superficiales del suelo (Reis *et al.*, 1985, citado por Oros, 2008); no obstante, algunas especies pueden alcanzar hasta 30 m de profundidad y extraer agua de 6 a 15 m de profundidad (Peck y Williamson, 1987). En cuencas hidrográficas experimentales de África el volumen de agua disminuyó cuando el bosque natural fue sustituido por una plantación de *E. grandis* después de cinco años de crecimiento de la plantación (Van Lill *et al.*, 1980).

*d) Biodiversidad.* El Eucalipto como otras especies arbóreas nativas o introducidas en su intento por sobrevivir y establecerse combaten la presencia de plantas en el sotobosque, sobre todo a través de monopolizar las capacidades productivas naturales del sitio. A pesar de que no existen suficientes datos experimentales, Montoya (1995) menciona que las especies de eucalipto, pueden generar productos químicos con funciones alelopáticas que tienen como finalidad eliminar a las demás especies que pudieran competir por nutrientes y agua, inhibiendo su germinación o crecimiento. Sin embargo, en las plantaciones comerciales una de las labores inevitables es ayudar a las plántulas a sobrevivir y desarrollarse, a través de combatir a la vegetación herbácea, arbustiva y arbórea que se establece y compite con ellas, al menos durante las primeras etapas de su desarrollo. En el mismo sentido, existen algunos estudios en los que se ha encontrado que las plantaciones de especies nativas o introducidas contribuyen a aumentar la diversidad biológica mediante el fomento de la regeneración de sotobosque (Guariguata *et al.*, 1995; Kuusipalo *et al.*, 1995; Haggard *et al.*, 1997; Keenan *et al.*, 1997 y Ahston *et al.*, 2001); existen estudios en los que se ha sugerido que las plantaciones pueden mejorar la diversidad en comparación con los terrenos degradados y deforestados debido al cambio de condiciones microclimáticas y estructurales del sitio, el desarrollo de humus y litter (Geldenhuys, 1997; Lugo, 1997; Parotta *et al.*, 1997; Turnbull *et al.*, 1997).

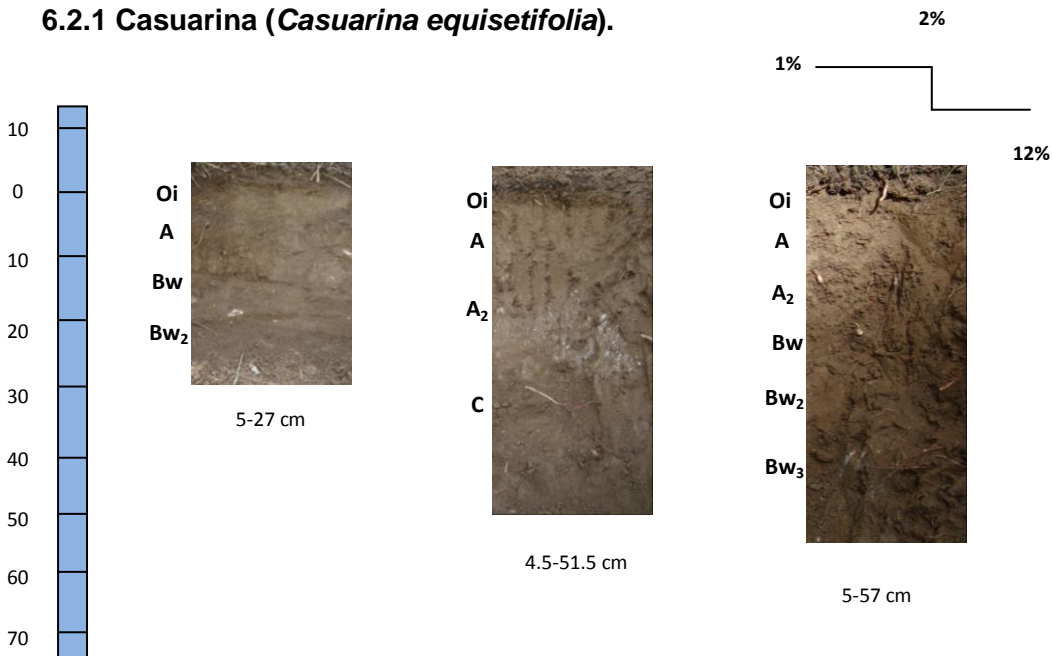
Otros estudios contradicen lo anterior, por ejemplo, Cavelier y Santos (1999) citado por Oros (2008) evaluaron la regeneración en plantaciones de *Pinus radiata*, *Cupressus lusitanica*, *Eucalyptus globulus* y *Alnus acuminata* con bosque natural en Colombia, encontrando una mayor riqueza en el bosque natural; en el mismo sentido se tiene el estudio realizado en una plantación de 8 años de *E. camaldulensis* para la recuperación

de una zona degradada en la que los resultados mostraron que la plantación no acelera la regeneración de especies en el sotobosque (Bone *et al.*, 1997).

De acuerdo con Montoya (1995) la vegetación natural presente en los rodales de eucalipto puede llegar a ser densa y abundante si las precipitaciones son elevadas y superiores a los 750 mm anuales. Su flora resulta ser igual a la común en la zona, cuando se le cultiva en condiciones de masas abiertas y abandonadas.

Los resultados reportados hasta el momento no son concluyentes acerca del efecto positivo o no de la plantaciones de eucalipto sobre la diversidad , por lo cual resulta necesario encontrar mayores evidencias y sobre todo considerar las condiciones sobre las cuales se realizan las comparaciones y conclusiones (Stephens y Wagner, 2007). Mucho depende del tipo de comparación que se establezca y del ecosistema al que reemplace la plantación, con claras ventajas de las plantaciones cuando estas substituyen a un uso que permita menor diversidad como son los pastizales o las áreas de cultivo marginales.

### 6.2.1 Casuarina (*Casuarina equisetifolia*).



EDAD ESTIMADA: 37 años

*Casuarina equisetifolia* es una especie que forma suelo en pendientes de tipo terraceda, es decir, son pendientes planas en donde se favorece el proceso de formación de suelo con el tiempo.

Se estimó que la edad de 37 años promedio (SAHR, 1990), es un indicador que permite establecer que esta especie forma de 0.6 a 1.68 cm por año a medida que la pendiente es mayor, es decir, está más abajo del nivel normal del suelo en que se encuentran las plantaciones, teniendo la pendiente influencia para que se desarrolle el suelo. Lo anterior, cumple con la finalidad de exportarlas a otros lugares, por considerarse por expertos forestales, una especie de rápido crecimiento, semiperenne, características que favorecen su introducción a ecosistemas degradados o con fines de reforestación (Evans, 1989).

En todos los perfiles de suelo descritos, se pudo observar horizontes de tipo A e incluso subdivisión del mismo a medida que la pendiente es mayor, lo que favorece la acumulación de materia orgánica en el suelo, trayendo diferentes beneficios a éste. Además se puede observar que aparte de los horizontes A que forma esta especie, existen horizontes Bw, es decir, horizontes incipientes con mínimo desarrollo de formación de estructura en el suelo, siendo parte del material original, pero que finalmente, ya se están formando subdivisiones del mismo, lo que favorece la formación del suelo sobre tepetate rojo en el sitio de estudio.

En su área de distribución natural, la casuarina ocurre en regiones costeras en dunas, llanos arenosos y en topografías con pendientes leves de hasta 100 m de elevación. Los suelos consisten típicamente de arenas sobre margas arenosas (Evans, 1989). En Micronesia, la casuarina ocurre de manera natural a lo largo de las costas y en sabanas elevadas tanto sobre suelos de piedra caliza como suelos volcánicos. En las áreas en donde ha sido introducida, la casuarina crece desde cerca del nivel del mar hasta una elevación de 1,750 m (CATIE, 1991).

La casuarina crece mejor en suelos porosos con buen drenaje y con una humedad y provisión de nutrientes adecuados, tales como aluviones causados por los ríos o las margas arenosas. Un buen crecimiento tiene lugar en arenas pobres en nutrientes, así como los suelos calcáreos y de salinidad moderada (Bandyopadhyay, 1986; Clemens, 1983; El-Lakany, 1983; Malik y Sheikh, 1983; Midgley *et al.*, 1986; Xu y Long, 1983), aun

cuando las tasas de crecimiento disminuyen bajo condiciones de salinidad excesiva y de saturación de sodio (Le Roux, 1974; Yadav, 1977). La casuarina crece bien en suelos con un amplio espectro de pH, desde 5.0 a 9.5 (CATIE, 1991, National Research Council, 1984; Yadav, 1977). Este árbol ha sido cultivado con éxito en sitios problemáticos, como en dunas (Maheut y Dommergues, 1959), despojos de minas de piedra caliza y estaño (Esbenshade, H.W.; Grainger, A. 1980; 96), y piedra pómez estéril (Thaiutsa, 1990). Las deficiencias de fósforo, evidenciadas por descoloraciones purpúreas en las ramillas, inhiben la fijación de nitrógeno por los simbiontes *Frankia* y pueden limitar la productividad de la casuarina en algunos sitios (Andéké-Lengui y Dommergues, 1983).

**6.2.1 Ocote (*Pinus montezumae*).**



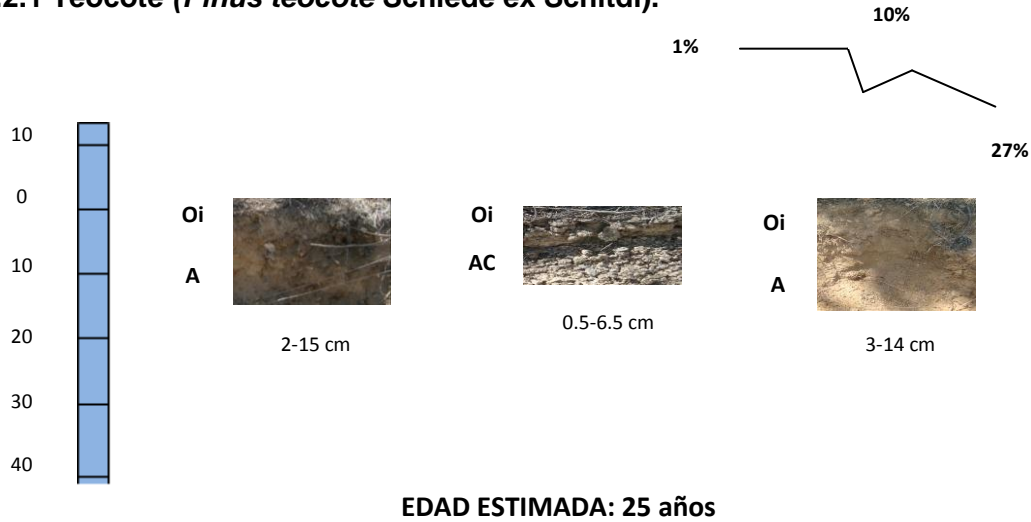
En *Pinus montezumae* se determinó una edad aproximada de 37 años, lo cual hace posible la determinación de centímetros por año (0.68, 0.46 y 0.68), esto refleja que no es una especie que sirva con fines de recuperación de suelos.

Se considera una especie maderable de gran importancia económica, de la que se obtienen un gran número de derivados. Presenta una amplia distribución en México y se ha utilizado en la recuperación de suelos degradados; además de que se recomienda para plantaciones ornamentales (Eguiluz, 1988). Sin embargo, poco se utiliza en plantaciones forestales comerciales, ya que durante la etapa de vivero, presenta un nulo crecimiento en altura (Calderón *et al.*, 2006).

Por su parte Arias y García (1992) evaluaron el incremento medio anual en altura (IMAA) y el incremento medio anual en volumen (IMAV) de diferentes especies arbóreas,

encontrando que después de casi 20 años de trabajo se han reforestado de acuerdo al Plan Lago Texcoco más de 5, 110 ha con diferentes especies; de las cuales, *Pinus montezumae* mostró los mayores incrementos medio anuales en altura y volumen en tepetate rojo (T3 sin carbonatos) que en el suelo. Otras coníferas importantes tuvieron mejor desarrollo cuando la plantación se hizo en suelo.

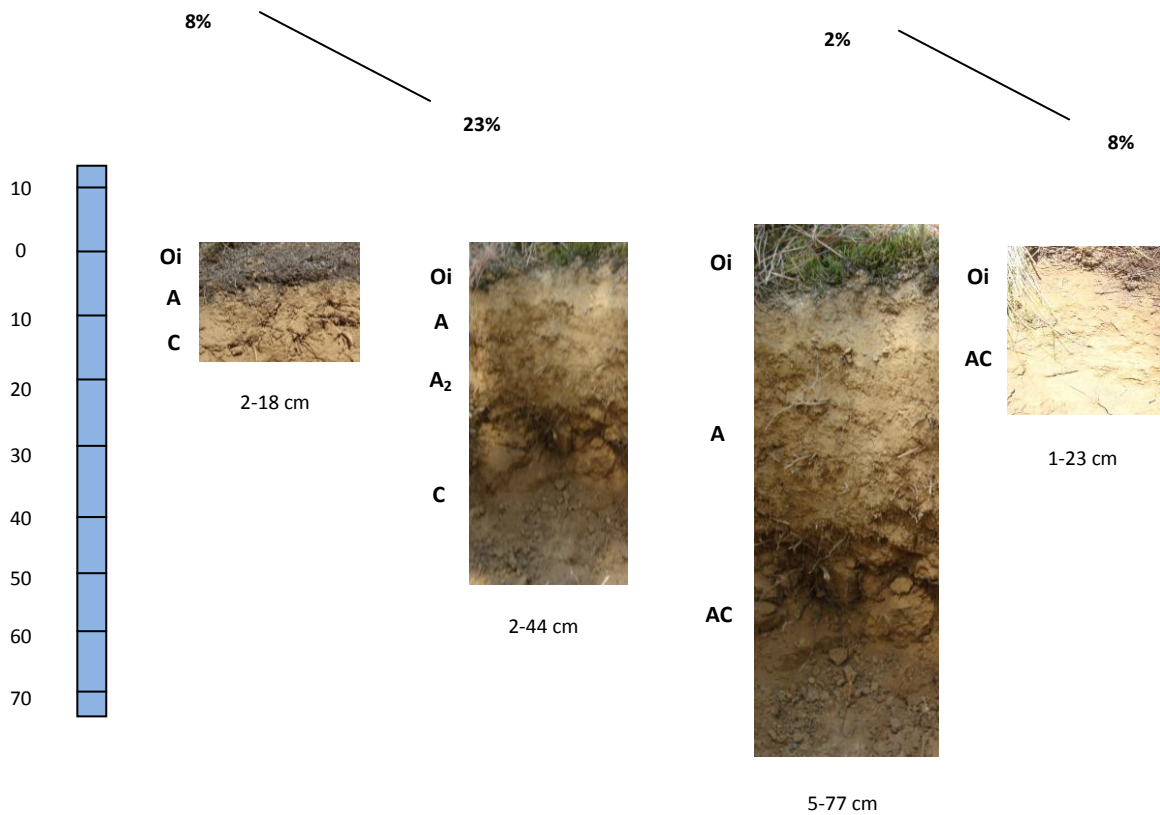
**6.2.1 Teocote (*Pinus teocote* Schiede ex Schltdl).**



En *Pinus teocote* el proceso de formación de suelo es prácticamente nulo, si se compara con las especies *Eucaliptus melliodora* y *Casuarina equisetifolia*, sin embargo, cabe resaltar que es similar a *Pinus montezumae*, ya que a pesar de tener una edad promedio estimada de 25 años, sólo forma 0.68 cm, 0.46 cm y 0.68 cm de suelo a diferente pendiente, que va de plana a pronunciada, lo que conlleva a determinar que es una especie que no tiene influencia marcada en la formación de suelo.

Se distribuye naturalmente desde los 15° N a los 29° 10' N en México, América del Norte; también ha sido reportada en Guatemala. Su distribución altitudinal varía de los 1500 a 3100 msnm, con precipitaciones anuales de 600 a 1500 mm y una temperatura promedio de 14° C, con temperaturas extremas de -14 a 38° C. Crece en rodales abiertos en asociaciones con especies como: *P. montezumae*, *P. leiophylla*, *P. rudis*, *P. chihuahuana*, *P. cembroides*, *P. engelmannii*, *P. oocarpa*, *P. patula* y *P. lawsoni*. ES una especie resistente a la sequia, pero nunca alcanza grandes dimensiones bajo condiciones secas (Perry, 1991).

**6.2.1 Cedro (*Cupressus lusitanica*).**



**EDAD ESTIMADA: 33 años**

Con respecto a *Cupressus lusitanica* se resalta que es una especie que forma 0.61 cm, 1.39 cm, 2.48 cm y 0.39 cm de suelo tanto en pendientes planas o suaves, como pronunciadas; con desarrollo de *litter* con grosores que van de 1 a 5 cm, además de formar horizontes A y subdivisión de éste (siendo similar a *Casuarina equisetifolia*) lo que favorece la acumulación de materia orgánica en el suelo, trayendo diferentes beneficios a éste. Sin embargo, en los perfiles descritos en esta especie no se encontraron horizontes incipientes (Bw), encontrándose en su lugar horizontes de transición AC, lo que permite establecer que existen horizontes con acumulación de raíces con horizontes C, es decir, de material parental en descomposición. Se considera que es una especie recomendada para fines de reforestación y rehabilitación del suelo, bajo los resultados de este estudio. Lemenih *et al.*, (2004) hicieron un estudio de *Cupressus lusitanica* y *Eucalyptus saligna*, comparando cultivos tradicionales vs cultivos mecánicos, mostrando éstos una alta compactación del suelo y mayor ineficiencia, reflejando a su vez el efecto positivo que tiene las especies en las propiedades del suelo, tanto físicas como químicas.



Concluyendo que las especies forestales pueden ser utilizadas para facilitar la restauración de suelos degradados en tierras de cultivo, pero éstas dependen del grado, tasa y dirección de los cambios en los atributos del suelo; por lo que sugiere su evaluación a largo plazo.

### 6.3 Relación de propiedades físicas del suelo por especie.

**Cuadro 3.** Propiedades físicas del suelo.

Horizonte Genético	Profundidad (cm)	COLOR		TEXTURA Clase textural	DAP (gcm <sup>-1</sup> )	R. DE HUMEDAD CC
		Seco	Húmedo			
<i>Eucaliptus globulus</i>						
Oi	8-0	5/3	4/1	Franco arenoso	1,03	34,4
A	0-13	6/3	4/2	Arena Francosa	1,06	22,7
Bw	13-30	5/3	4/3	Franco arcillo arenoso	1,66	26,4
Bw <sub>2</sub>	30-56	6/2	4/3	Arcilla	1,87	57,3
Oi	6-0	5/4	3/2	Franco arcillo arenoso	0,88	ND
Bw	0-9	5/4	3/2	Franco arcillo arenoso	1,47	ND
Bw <sub>2</sub>	sep-36	6/3	3/2	Arcilla	1,54	ND
Bw <sub>3</sub>	36-47	6/2	5/2	Arcilla	1,85	ND
Oi	1-0	6/4	5/3	Franco arenoso	1,29	23,4
Bw	0-14	5/3	3/3	Franco	1,11	23,8
Bw <sub>2</sub>	14-26	6/4	3/3	Franco arenoso	1,24	19
Bw <sub>3</sub>	26-41	5/4	4/2	Franco	1,3	26,9
<i>Casuarina equisetifolia</i>						
Oi	5-0	4/1	4/2	Franco	0,58	51,6
A	0-6	3/3	5/3	Arena francosa	1,53	14,9
Bw	jun-16	4/2	5/3	Franco arenoso	1,53	14,3
Bt	16-27	4/2	5/3	Franco arcillo arenoso	1,6	21,9
Oi	4,5-0	3/2	4/2	Franco arcillo limoso	1,11	65,2
A	0-6,5	5/3	3/3	Arcilla	1,48	35,6
A <sub>2</sub>	6,5-28,5	5/3	4/2	Franco arcilloso	1,64	28,4
C	28,5-51,5	6/3	4/2	Franco arcillo arenoso	1,63	21,4
Oi	5-0	3/3	3/2	Franco arcillo arenoso	0,48	59,2
A	0-8	6/3	3/4	Arcillo limoso	1,3	37
A <sub>2</sub>	ago-14	6/4	3/4	Franco arcillo limoso	1,33	36
Bw	14-23	5/3	4/2	Arcillo limoso	1,27	37,7
Bw <sub>2</sub>	23-36	6/3	5/3	Arcilla	1,72	34,9
Bw <sub>3</sub>	36-57	6/2	5/2	Arcilla	1,73	34,5
<i>Pinus montezumae</i>						
Oi	2-0	4/2	3/2	-	0,5	68,2
Ac	0-17	7/3	5/4	Franco arcillo arenoso	1,58	31,4
2C	17-21	7/4	6/6	Franco arenoso	1,43	41,8
Oi	2-0	4/2	3/2	Franco	1,43	53,7
Bw	0-8	7/2	7/6	Arena Francosa	1,53	37,6
C	ago-16	8/2	8/6	Arena	1,61	42,3
Oi	2-0	4/2	3/2	Franco limoso	0,32	92,6
A	0-21	8/3	6/4	Arena francosa	1,46	41
AC	21-37	8/3	6/4	Arena	1,46	43
<i>Pinus teocote</i>						
Oi	2-0	4/2	3/2	Franco	1,23	37
A	0-15	8/4	5/4	Arena Francosa	1,1	38,3
Oi	0,5-0	6/2	5/2	Franco arenoso	1,31	38,4
AC	0-6,5	6/2	6/3	Arena francosa	1,6	30,5
Oi	3-0	5/4	4/4	Franco arenoso	1,4	46,7
A	0-14	7/4	6/4	Arena francosa	1,35	49,9
<i>Cupressus lusitánica</i>						
Oi	2-0	4/2	3/2	Arcillo limoso	0,4	73,7
A	0-10	7/6	4/4	Arcillo limoso	1,16	53,7
C	oct-18	7/4	5/4	Arcilla	1,24	57
Oi	2-0	5/4	4/3	Arcillo limoso	1,11	61,1
A	0-3	7/6	4/4	Franco arcilloso	1,03	62,6
A <sub>2</sub>	mar-24	7/6	4/6	Franco arcilloso	1,04	72,7
C	24-44	6/6	5/6	Franco arcilloso	1,07	60,2
Oi	5-0	5/2	4/2	-	1,32	45,7
A	0-35	7/3	5/3	Franco arcillo arenoso	1,83	38,8
AC	35-77	7/6	4/6	Franco arcillo arenoso	1,35	48,1
Oi	1-0	4/1	3/1	Arcillo limoso	1,23	80
AC	0-12	3/4	5/6	Arcilla	1,34	48,5

\* Todos los Hue se obtuvieron con 10YR

a) *Color*. El color del suelo en seco como húmedo más oscuro se presenta en *Casuarina equisetifolia* y *Eucalyptus globulus* en los horizontes O y A, ya que sus cromas y valores son de 5 o menos y 3 o menos; mientras que en otras especies como *Pinus montezumae*, *Pinus teocote* y *Cupressus lusitánica* los valores y los cromas son más altos entre 6 y 7 (Cuadro 3). Esto significa que el proceso de melanización está oscureciendo a mayor velocidad en las primeras especies forestales. De acuerdo con la Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff, 2010), los epipedones que tienen estos colores son los mólicos o úmbricos, donde la acumulación de material orgánica es importante en la formación de suelos. Los colores con cromas y valores altos son los característicos de los tepetates.

El color refleja las propiedades biofísicoquímicas de la relación suelo-planta y está influido por los porcentajes de materia orgánica, así como por el tipo de ésta. En el caso particular de *Eucalyptus globulus*, *Casuarina Equisetifolia* y *Pinus teocote*; se tienen horizontes en sus perfiles color pardo oscuro; son suelos que contienen materia orgánica descompuesta (lo que les da ese color característico), aunque cabe señalar que si están mal drenados, hay una mayor acumulación de materia orgánica en las capas superficiales, dándole a estos una coloración más oscura; pardo grisáceo pálido, siendo suelos que están compuestos de minerales disgregados que sufrieron poco cambio químico; y pardo amarillo, refleja que el drenaje es intermedio (Aguilera, 1989; Buol *et al.*, 1998; Porta *et al.*, 1999).

El suelo bajo *Pinus montezumae* y *Cupressus lusitánica* presentan ligeras diferencias en comparación con las de *Eucalyptus globulus*, *Casuarina Equisetifolia* y *Pinus teocote*, por presentar colores grisáceos y blanco (para el caso particular de *Pinus montezumae*), lo que indica una baja productividad y las plantas se desarrollan mal. En *Cupressus lusitánica* se tienen suelos con colores amarillos, principalmente lo que representa que no tiene problemas de drenaje, están bien aireados y no se encharca; y pardos muy pálidos a mayor pendiente y profundidad en el perfil.

Peña y Zebrowski (1992) señalan que el tepetate rojo (identificado como T3) se caracteriza por presentar colores intensos, variando de amarillo a pardo (10YR6/6-7/6, seco a 7.5 YR4/6-5/6, húmedo).

b) *Clase textural*. Con base en el triángulo de texturas se tienen una amplia variedad de clases texturales en los suelos bajo estudio, desde arcillosa hasta arena francosa (Cuadro 3); aunque dominan las francas. Esta alta variabilidad está relacionada con la manera en

que fueron realizadas las terrazas y del tipo de material parental que les dio origen. En términos generales se puede indicar que las texturas francas se presentaron en *Casuarina equisetifolia*, las gruesas en *Pinus montezumae* y *Pinus teocote* y las más finas en *Cupressus lindely*. A pesar de que se trató de buscar homogeneidad en el tipo de material parental para contrastar entre diferentes especies forestales, esto no se logró debido a que las terrazas se formaron de diferente manera por la evaluación de proyecto Lago de Texcoco (SAHR, 1990) y los materiales parentales o el tepetate rojo expusieron diferentes materiales a la superficie.

El tepetate rojo está conformado por diferentes discontinuidades litológicas (Hidalgo *et al.*, 1992; Gutiérrez y Ortiz, 1992; Quantin, 1992) en donde los procesos erosivos ha generado que afloren diferentes estratos a la superficie. Estos materiales posteriormente fueron alterados a través de la formación de terrazas durante los años 70 por parte de la comisión del Lago de Texcoco (SAHR, 1990).

De acuerdo con los trabajos realizados sobre las propiedades físicas, los tepetates exhiben una matriz compuesta por arena, limo y menores porcentajes de arcilla (Miehlich, 1992; Peña y Zebrowski, 1992), sin embargo en ocasiones pueden presentar contenidos altos de esta fracción. Esta variabilidad constituye una problemática para los trabajos encaminados a la rehabilitación de los tepetates, ya que cada clase textural genera un comportamiento físico y mecánico independiente, el cual, indudablemente, requiere de una investigación específica. Para el caso específico del tepetate rojo (T3), los resultados analíticos confirman que los tepetates de esta seir son más arcillosos que los tepetates grises (T2), lo que indica una alteración más fuerte para los materiales T3 que para los materiales T2 (Peña y Zebrowski, 1992).

c) *Densidad aparente (Da)*. La densidad aparente es la medida en peso del suelo por unidad de volumen (g/cc), está relacionada con el peso específico de las partículas minerales y las partículas orgánicas, así como por la porosidad de los suelos.

En términos generales, los horizontes O con con *litter presentan Da*, bajas que van de 0.34 a 1.32 gcm<sup>-1</sup> y se incrementan con la profundidad (desde 1.11 a 1.83 gcm<sup>-1</sup>). Esto permite esclarecer que las especies ejercen influencia para evitar que el suelo este muy denso en los horizontes superficiales, lo que favorece la entrada de raíces en algunos perfiles, que a su vez puedan formar con el tiempo horizontes de tipo A (en algunas especies aún no están formados), principalmente en *Eucaliptus globulus* (Cuadro 3).

Con base en las investigaciones realizadas por diferentes autores (Etchevers *et al.*, 1992; Gutiérrez-Castorena y Ortiz-Solorio, 1992; Miehlich, 1992; Peña y Zebrowski, 1992; Peña *et al.*, 1992) resulta posible inferir que independientemente de su origen, los tepetates siempre presentan, dentro de un rango, propiedades físicas, mecánicas y químicas que le son comunes entre sí. Destaca su compactación o cementación, que se reflejan en densidades aparentes altas (1.7-1.9 g/cm<sup>3</sup>), una porosidad baja de 13 a 24%, así como conductividades hidráulicas y retención de humedad bajas. Estas características, impiden o limitan significativamente la incorporación rápida de plantas primarias, debido a que limitan su crecimiento radicular lo que propicia una baja cobertura vegetal y la posterior erosión del suelo.

d) *Retención de humedad (capacidad de campo)*. La Capacidad de Campo (CC) es una propiedad de suelo que indica el contenido de agua o humedad que es capaz de retener éste luego de saturación o de haber sido mojado abundantemente y después dejado drenar libremente, evitando pérdida por evapotranspiración hasta que el Potencial hídrico del suelo se estabilice (alrededor de 24 a 48 horas luego de la lluvia o riego) (Buol *et al.*, 1998; Porta *et al.*, 1999).

Teniendo como base lo anterior, es importante entonces, determinar la especie que contribuya en la retención de humedad del suelo, relacionando a su vez si tiene o no impacto la pendiente. En la figura 7 se observa, tomando en cuenta el sitio de muestreo por especie, de manera evidente que *Cupressus lindely* tiene el mayor porcentaje de retención de humedad (60-70%), le siguen *Pinus teocote* y *Pinus montezumae* (40-50%), siendo *Casuarina equisetifolia* y *Eucaliptus globulus*, las especies que menor porcentaje de humedad captan del suelo (20-40%), demostrándose así que la pendiente no tiene influencia en los valores de estas especies.

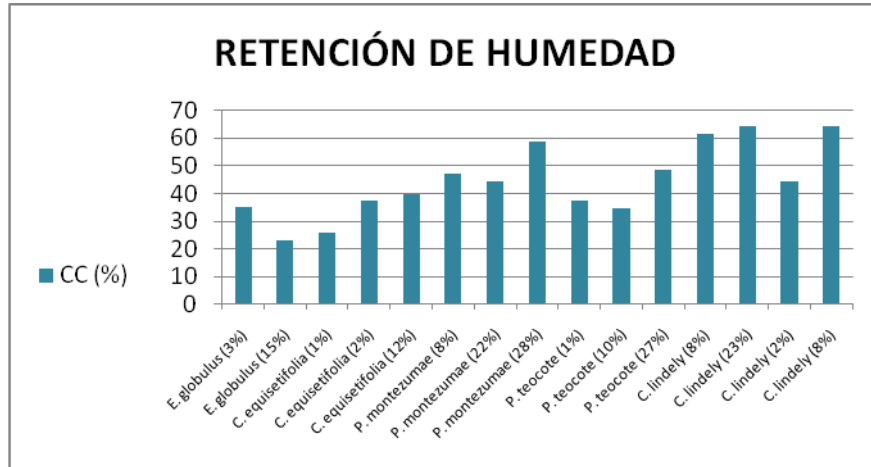


Figura 7. Promedio por especie de acuerdo con la profundidad y la pendiente.

Sin embargo, si se toman en cuenta los datos promediados, y no por sitio de muestreo, las especies que tiene la mayor retención de humedad siguen siendo *Cupressus lusitanica* y *Pinus montezumae* y las que lo hacen en menor proporción son *Casuarina equisetifolia* y *Eucaliptus globulus* (figura 8).

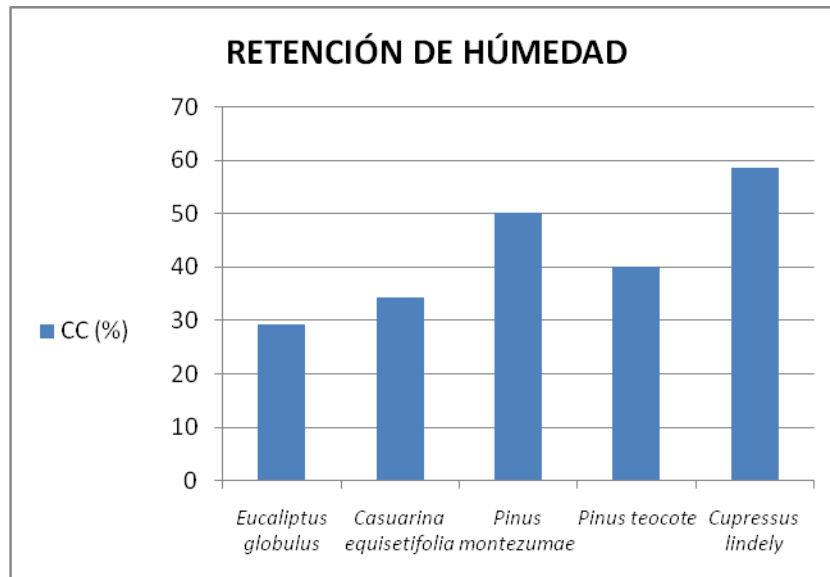


Figura 8. Promedio de porcentaje de retención de humedad por especie.

De acuerdo a estudios realizados por Mielich (1992), citado por Rugama (1997) sobre las características físicas de los tepetates T3 localizados al pie de la sierra Nevada y en el bloque de Tlaxcala, éstos presentan los siguientes valores promedio: densidad aparente ( $1.3 \text{ g/cm}^3$ ); porosidad total (49%); poros mayores de  $10 \mu\text{m}$ : 9.5 %; entre 10 y  $0.2 \mu\text{m}$ : 10.5%; menores de  $0.2 \mu\text{m}$ : 21%; resistencia mecánica ( $366 \text{ kg/cm}^2$ ) e infiltración ( $2.5 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$ ). Estos resultados coinciden con los reportados por Aeppli (1973), Mielich (1974), Wegener (1978), y Werner (1988), citados por Rugama (1997).

#### 6.4 Relación de propiedades químicas por especie

**Cuadro 4.** Propiedades químicas del suelo por especie.

Hor. Genético	Profundidad (cm)	pH	% CO	CIC (cmol kg <sup>-1</sup> )	Na	K	Ca	Mg	PSB
<i>E. globulus</i>									
Oi	8-0	6	7.93	23.5	0.224	0.2803	9.576	1.581	49.54
A	0-13	4.9	1.29	9.8	0.224	0.2166	1.6142	1.308	34.162
Bw	13-30	5.8	0.94	18.2	0.4223	0.2421	10.771	3.141	80.137
Bw <sub>2</sub>	30-56	6	0.69	62.3	0.5545	0.4078	24.723	6.238	51.264
Oi	6-0	5.2	10.08	82.4	0.3121	0.4844	22.11	3.071	31.53
Bw	0-9	5.1	1.97	62.5	0.1799	0.2803	5.0068	2.097	12.104
Bw <sub>2</sub>	9-36	6	1.03	65.7	0.3121	0.2548	13.863	3.852	27.828
Bw <sub>3</sub>	36-47	6.2	0.77	79.2	0.224	0.1145	11.182	3.363	18.798
Oi	1-0	4.9	6.43	32.5	0.202	0.3058	3.5535	1.167	16.072
Bw	0-14	4.6	1.72	22	0.1799	0.2166	1.479	1.459	15.126
Bw <sub>2</sub>	14-26	5.2	1.29	17.1	0.1799	0.2293	4.1331	1.764	36.835
Bw <sub>3</sub>	26-41	6	1.29	18.6	0.4444	0.3186	11.562	1.801	75.871
<i>C. equisetifolia</i>									
Oi	5-0	5.4	38.59	56.7	0.224	1.0454	50.178	3.587	97.046
A	0-6	5.2	1.2	13.3	0.1799	0.3823	8.7892	2.076	86.127
Bw	6-16	5	1.11	12	0.224	0.3186	6.9315	2.078	79.707
Bw <sub>2</sub>	16-27	5.8	0.94	15.6	0.1799	0.2293	9.5501	3.651	87.122
Oi	4,5-0	5.9	19.29	46	0.246	1.4005	49.986	6.711	100
A	0-6,5	5.4	8.06	26.1	0.1799	0.3696	14.068	3.358	68.848
A <sub>2</sub>	6,5-28,5	5.6	1.37	19	0.224	0.2166	10.588	3.804	77.878
C	2,5-51,5	5.9	0.77	16.3	0.1799	0.1911	8.6104	3.336	75.737
Oi	5-0	5.6	22.3	54.1	0.1359	1.0199	44.943	5.821	95.895
A	0-8	5.4	6	33	0.1359	0.5609	11.502	3.333	47.13
A <sub>2</sub>	8-14	5.4	6.65	28.5	0.1359	0.3951	8.0669	3.221	41.526
Bw	14-23	5.4	2.83	26.8	0.1579	0.3313	11.109	4.243	59.221
Bw <sub>2</sub>	23-36	5.6	1.29	31.9	0.224	0.2803	11.363	4.303	50.711
Bw <sub>3</sub>	36-57	5.9	0.94	30.4	0.246	0.3313	12.436	4.449	57.465
<i>P. montezumae</i>									
Oi	2-0	5	7.29	38.7	0.224	1.0199	34.632	6.775	100
Ac	0-17	6.3	0.69	25.9	0.3121	0.9817	32.764	7.452	100
2C	17-21	6.5	0.86	55	0.4444	1.1475	26.048	3.003	55.715
Oi	2-0	6.2	7.29	38.9	0.224	0.8542	32.059	3.151	93.171
Bw	0-8	6.6	2.57	49.2	0.3783	1.2112	38.487	9.144	100
C	8-16	7.7	0.51	46.7	0.7088	1.1602	38.089	7.331	100
Oi	2-0	5.8	12.86	38.9	0.1359	0.9179	33.936	4.827	102.23
A	0-21	6.7	1.72	39.2	0.224	0.7776	25.691	4.645	80.02
AC	21-37	7.5	0.43	48.6	0.4003	0.9562	29.96	6.334	77.507

<i>P. teocote</i>									
Oi	2-0	6.9	5.36	38.5	0.2901	0.7776	34.314	6.37	100
A	0-15	7.2	0.6	40	0.202	0.3696	21.481	3.864	64.763
Oi	0.5-0	6.5	3.17	38.9	0.3121	0.5736	35.912	11.99	100
AC	0-6,5	6.9	0.77	49	0.4884	0.6119	42.048	10.16	100
Oi	3-0	7.2	4.12	47.3	0.224	0.6629	26.613	3.573	65.703
A	0-14	7.8	1.11	47.7	0.246	0.9689	36.742	5.481	91.022
<i>C. lusitánica</i>									
Oi	2-0	5.7	41.16	51.1	0.202	0.7139	22.772	5.863	57.777
A	0-10	6.1	1.03	61.4	0.3783	0.5609	10.334	3.57	24.167
C	10-18	6.6	0.77	56.7	0.841	0.6756	11.23	3.719	29.035
Oi	2-0	5.6	17.15	69.8	0.3342	0.8542	15.507	4.02	29.694
A	0-3	6	1.11	71.3	1.2817	0.7011	14.463	4.39	29.239
A <sub>2</sub>	3-24	6.5	0.6	51.8	1.3919	0.4716	9.5283	3.105	27.993
C	24-44	6.7	0.51	47.1	1.5681	0.5354	9.212	2.952	30.305
Oi	5-0	6.5	2.57	41.9	0.224	1.6555	26.013	5.739	80.183
A	0-35	6.8	0.6	34.7	0.2681	1.0072	27.452	6.018	100
AC	35-77	6.8	0.43	37	0.3121	2.5482	29.278	5.017	100
Oi	1-0	6.9	81.47	74.3	0.202	1.528	31.626	4.978	51.622
AC	0-12	6.2	1.03	48.4	0.1799	1.528	10.297	2.291	29.558

El conocimiento de las características químicas de los suelos es fundamental para el entendimiento de su génesis y el diseño de prácticas de manejo adecuadas. La información actual sobre este aspecto en el caso de los tepetates es limitada (Etchevers *et al.*, 1992).

Aunado a las características físicas, se debe señalar que los tepetates también poseen propiedades químicas que les confiere una baja fertilidad natural, aun cuando algunos de ellos pueden tener una composición mineralógica, potencialmente rica en cationes intercambiables (Flores *et al.*, 1996).

a) *Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)*. La capacidad de intercambio catiónico es la capacidad que tiene un suelo para retener y liberar iones positivos, merced a su contenido en arcillas. Éstas están cargadas negativamente, por lo que suelos con mayores concentraciones de arcillas exhiben capacidades de intercambio catiónico mayores.

Las especies que presentan una mayor capacidad de intercambio catiónico son *Eucalyptus globulus*, *Cupressus lusitánica* y *Casuarina equisetifolia* con valores que oscilan entre (82-69-54 cmol kg<sup>-1</sup>) sobre todo en el horizonte Oi; en contraste, *Pinus teocote* y *Pinus montezumae* la presentan con valores entre 47-38 cmol kg<sup>-1</sup> (ver Cuadro 4).

b) *pH*. Una de las características más importantes del suelo es su reacción, debido a que los microorganismos y plantas superiores responden notablemente a su medio químico, la importancia de la reacción del suelo y de los factores asociados con ella ha sido débilmente reconocida. Tres condiciones son posibles: acidez, neutralidad y alcalinidad. (Aguilera, 1989; Buol *et al.*, 1998; Porta *et al.*, 1999)

Haciendo alusión a lo anterior, para el caso de *Eucaliptus globulus* y *Casuarina equisetifolia*, como lo muestra el Cuadro 4, se tienen suelos fuertemente ácidos a medianamente ácidos, en estos suelos ácidos muy pocos alimentos son tomados por las raíces de las plantas, reduciéndose la actividad de los microorganismos.

Para el caso de *Pinus montezumae*, *Pinus teocote* y *Cupressus lusitánica*, se tienen suelos medianamente y ligeramente ácidos, neutros y ligeramente básicos a medida que la profundidad es mayor. Lo ideal es que los suelos un intervalo de pH comprendido entre 6 y 7, siendo el más adecuado para la asimilación de nutrientes por parte de las plantas, además de que los microorganismos del suelo proliferan con valores de pH medios y altos, reduciéndose su actividad con pH inferior a 5.5.

c) *Carbono orgánico*. La especie que mayor carbono orgánico aporta al suelo es *Cupressus lusitánica*, tal como lo muestra el Cuadro 4, con valores entre 81-41%; en segundo lugar le sigue *Casuarina equisetifolia* con valores que oscilan entre 38-22% y las que lo hacen en menor proporción son *Pinus montezumae* y *Pinus teocote* con valores entre 10-6%.

El contenido de carbono orgánico en los tepetates cultivados y no cultivados es bajo. Etchevers y Brito (1997), citados por Baez (2001), hicieron un levantamiento nutrimental de los tepetates no cultivados en México y Tlaxcala, y los resultados que presentaron demuestran que los niveles de nutrimentos como N y P disponibles en el suelo, con insuficientes, para producir cualquier tipo de cultivo. Parte importante de la situación anterior se deriva de la baja presencia de materia orgánica de estas zonas. Perez *et al.*, (2000) por su parte, evaluaron la mineralización de los pocos residuos vegetales de maíz y frijol, que dejan los productores en el terreno de cultivo después de las cosechas, en parcelas de tepetates que habían sido recién roturados (1 año) y otras que habían sido incorporadas a la producción hace aproximadamente 60 años. Estos investigadores determinaron que la cantidad de carbono orgánico en todos los tepetates era baja, independientemente de su historial de manejo agronómico. Esta situación requiere



especial atención porque no es posible mejorar las condiciones físicas y químicas de los tepetates en orden a aumentar la producción agrícola, sin incrementar los porcentajes de materia orgánica. Ésta, además de proveer los nutrientes en déficit y otros nutrientes esenciales, se sabe contribuye significativamente a mejorar algunas propiedades físicas del suelo relacionadas con la productividad agrícola del mismo (Ortíz y Ortíz, 1990).

Además, con la incorporación de abonos orgánicos como pajas y estiércoles es importante para el mejoramiento de la estructura del suelo y al acumulación de reservas orgánicas, pero los beneficios de estas prácticas agrícolas son a largo plazo. Sin embargo, en el caso de la incorporación de estiércoles de buena calidad (relación C/N 20:1) se han observado resultados favorables inmediatos en cuanto a aspectos nutrimentales (Álvarez *et al.*, 2000; Báez *et al.*, 1997; Ferrera *et al.*, 1997; Navarro y Flores, 1997). El uso de fertilizantes químicos, la adecuada selección y rotación de cultivos, la asociación de gramíneas con leguminosas y las técnicas de captación de lluvia, son indispensables para obtener buenos resultados en los primeros años de cultivo (Prat y Báez, 1998).

Los resultados anteriores ratifican la información generada por la observación de un número limitado de autores como Álvarez *et al.*, (2000), Etchevers *et al.*, (1992), Pérez *et al.*, (2000) y los reportes publicados por Ruiz (1987), que proporcionan información valiosa para planear las prioridades de atención que requiere el estudio de los diferentes problemas nutrimentales.

h) *Porcentaje de Saturación de Bases.* *Eucaliptus globulus* y *Casuarina equisetifolia*, presentan en sus horizontes un porcentaje de saturación de bases un tanto menor, en comparación con los horizontes de suelo de *Pinus montezumae*, *Pinus teocote* y *Cupressus lusitánica*, tal como lo muestra el Cuadro 4.

En general, se tienen grandes cantidades de magnesio y calcio en todos los perfiles de suelo en cada una de las especies, lo que representa iones importantes para la asimilación de las plantas; en cambio, se tienen cantidades poco significativas de sodio y potasio en todos los perfiles de suelo de cada una de las especies.

### 6.5 Relación de propiedades micromorfológicas por especie

Al ser la micromorfología una rama de la Ciencia del Suelo que se relaciona con la descripción, interpretación y principalmente con la medición de los componentes, rasgos y fábricas de los suelos a un nivel microscópico (Bullock *et al.*, 1985); es fundamental, para ello, un entendimiento de los procesos involucrados en la formación del suelo, debido a que se pueden inducir por fuerzas naturales o inducidos artificialmente por la acción del hombre.

En el cuadro 5 se aprecian datos micromorfológicos de algunas especies forestales.

La materia orgánica (como lo señala Aguilera, 1993), es insoluble en agua y evita el lavado de los suelos y la pérdida de nutrientes; tiene una alta capacidad de absorción y retención de agua; absorbe varias veces su propio peso en agua y la retiene, evitando la desecación del suelo; mejora las condiciones físicas, químicas y biológicas de los suelos; los suaviza; permite una aireación adecuada; aumenta la porosidad y la infiltración de agua, entre otros. Es una fuente importante de nutrientes, a través de los procesos de descomposición con la participación de bacterias y hongos, especialmente; absorbe nutrientes disponibles, los fija y los pone a disposición de las plantas; mantiene la vida de los organismos del suelo, esenciales para los procesos de renovación del recurso.

Con base en el cuadro 5, las especies que presentan mayor actividad biológica son *Eucaliptus globulus* y *Casuarina Equisetifolia*, debido a que la microestructura que domina es tipo migajosa (figura 11A) y granular (figura 11E) y en menor proporción bloques subangulares con moderado desarrollo, en el caso de *Pinus teocote* (figura 11F).

De manera particular, en el caso de *Eucaliptus globulus* se encontraron restos de hifas en un perfil de suelo, reflejando la actividad que tienen éstas en el mismo (figura 14D). Además de encontrar fitolitos en Eucaliptos globulus y Cupressus lusitanica (figura 14A, B). Al respecto, estudios realizados por Flores *et al* (1996) indican que los porcentajes de materia orgánica y nitrógeno total son bajos, la primera se requiere para la retención de nutrimentos y el segundo que representa un elemento esencial para el desarrollo vegetal. Por otra parte, las deficiencias en materia orgánica se deben a que la baja porosidad que los tepetates tienen, de manera que la vegetación difícilmente puede colonizarlos. Sin embargo, también es posible que después de su emplazamiento no haya habido tiempo suficiente para que pudieran ser afectados por la biota.

**Cuadro 5.** Análisis micromorfológicos del suelo de especies forestales.

ESPECIE	PENDIENTE	MICROESTRUCTURA (%)				POROSIDAD (%)	TIPO DE PORO (%)						TIPO DE EXCREMENTO (%)		COMPONENTES ORGÁNICOS							
		Mi	Gr	Bls	L		E. cmp	E. cpl	Ca	Cav	Ves	Fis	Ac	Mes	R. co	R. ra	R. mi	R. ho	R. ho mi	Hi	Fi	
1	3	30	10	0	0	25-30	8	15	0	7	0	0	2	0	x	x	0	0	0	0	x	
1	5	25	15	0	0	30-35	8	15	5	6	0	0	0	3	0	x	X	0	0	0	X	0
1	15	35	5	0	0	20-25	8	10	0	5	3	0	0	8	X	x	X	0	0	0	0	0
2	1	30	10	8	0	65-70	15	5	0	20	8	5	0	2	X	x	0	0	0	0	0	0
2	2	25	5	8	0	45-50	15	10	8	5	8	5	0	8	X	x	0	0	0	0	0	0
2	12	25	8	5	0	45-50	15	10	0	0	10	5	0	15	X	x	0	0	0	0	0	0
3	8	10	5	8	0	25-30	5	5	0	10	5	3	0	5	X	0	X	0	X	0	0	0
3	22	10	5	0	0	35-40	15	10	0	10	5	0	0	0	0	x	0	X	X	0	0	0
3	28	15	8	0	0	oct-15	5	5	2	3	0	0	3	0	X	x	0	X	X	0	0	0
4	1	15	5	10	0	20-25	0	12	0	8	2	3	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0
4	10	5	20	15	0	15-20	0	12	0	2	3	3	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0
4	27	20	15	20	0	15-20	0	8	0	4	5	3	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0
5	8	10		10	20	20-25	0	5	0	5	0	10	0	0	x	x	0	0	X	0	0	x
5	23	10	15	10	0	30-35	8	9	3	5	0	10	3	0	x	x	0	0	0	0	0	0
5	2	15	10	15	0	25-30	8	12	0	8	0	2	3	0	x	x	0	0	0	0	0	0
5	8	10	15	0	0	30-35	10	0	5	10	8	2	12	0	x	x	0	0	0	0	0	0

Especies (**1** Eucalyptus globulus, **2** Casuarina equisetifolia, **3** Pinus monezumae, **4** Pinus teocote, **5** Cupressus lusitanica). Estructura (**Mi** Migajosa, **Gr** Granular, **Bls** Bloques subangulares, **L** Laminar).

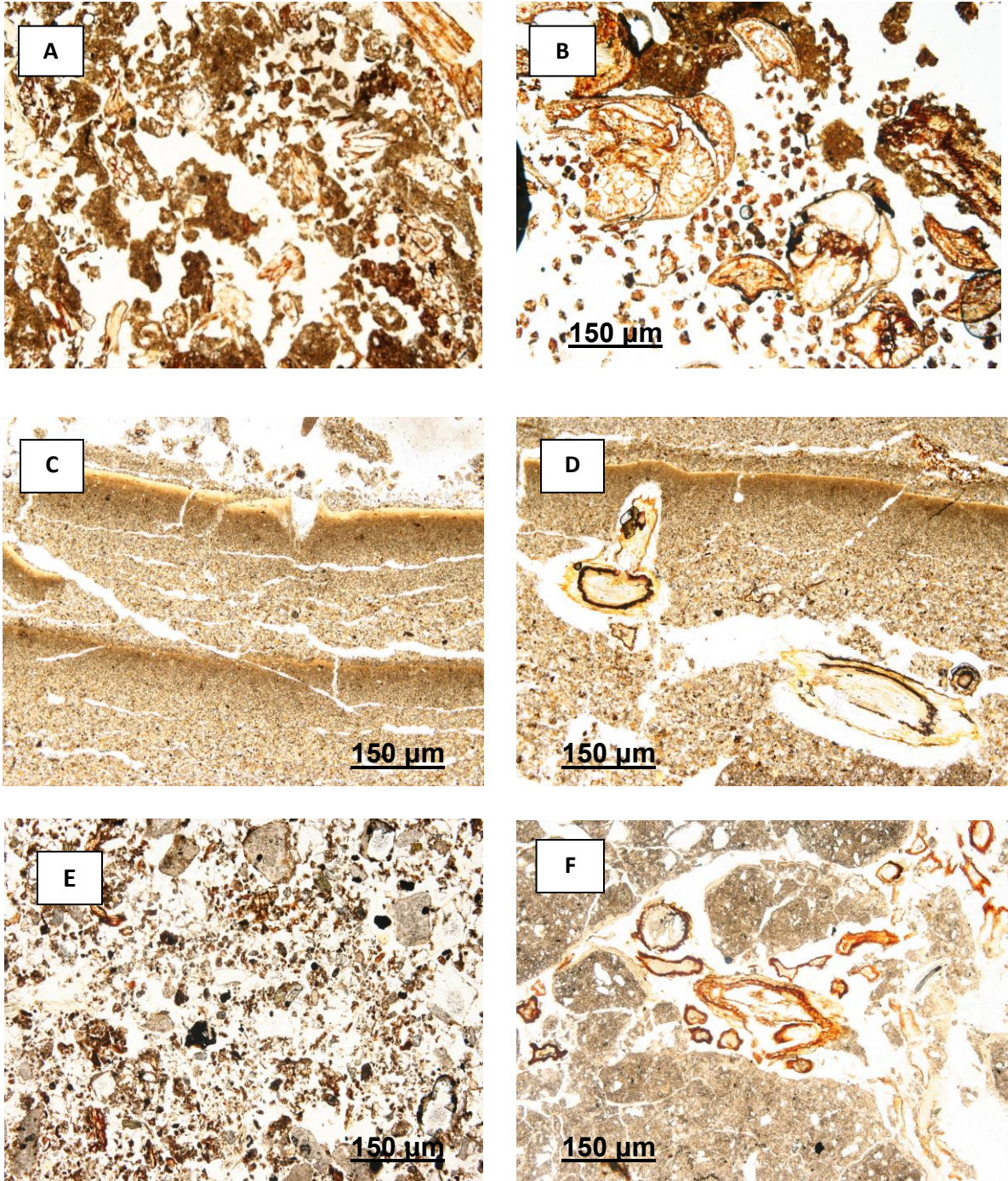
Tipo de poro (**E. cmp** Empaquetamiento compuesto, **E. cpl** Empaquetamiento complejo, **Ca** Canal, **Cav** Cavidad, **Ves** Vesicular). Tipo de excremento (**Ac** Acaros, **Mes** Mesofauna).

Componentes orgánicos (**R. co** Raíces complejas, **R. re** Restos de raíces, **R. mi** Raíces mineralizadas, **R. ho** Restos de hojas, **R. ho mi** Restos de hojas mineralizadas, **Hi** Hifas, **Fi** Fitólitos)

Cabe destacar que curiosamente *Casuarina equisetifolia* a pesar de tener en su microestructura estos bloques subangulares (los cuales representan falta de degradación de la materia orgánica), tiene el más alto porcentaje de porosidad (65-70%), el más alto porcentaje de excremento de mesofauna (Figura 10A), siguiéndole *Eucalyptus globulus* (Figura 10D,E); a diferencia de *Cupressus lusitanica*, que presentó actividad de ácaros (Figura 10B) y en algunos casos estaban incrustados en el interior de raíces (Figura 10C), también en este caso *Pinus montezumae* (Figura 10F), lo cual indica que este suelo es propicio para la actividad de la misma; raíces completas, es decir, sin grado de alteración y, restos de raíces. Lo anterior puede explicarse a la existencia precisamente de raíces, las cuales ejercen un papel muy importante en los procesos de degradación de la materia orgánica, por contener en su composición exudados que ayudan a la degradación de la misma e incorporando de esta manera microagregados al suelo, facilitando así, la porosidad en el suelo en varios tipos (cavidad, canal, vesicular y fisura) (Boul et al., 1998; Porta et al., 1999).

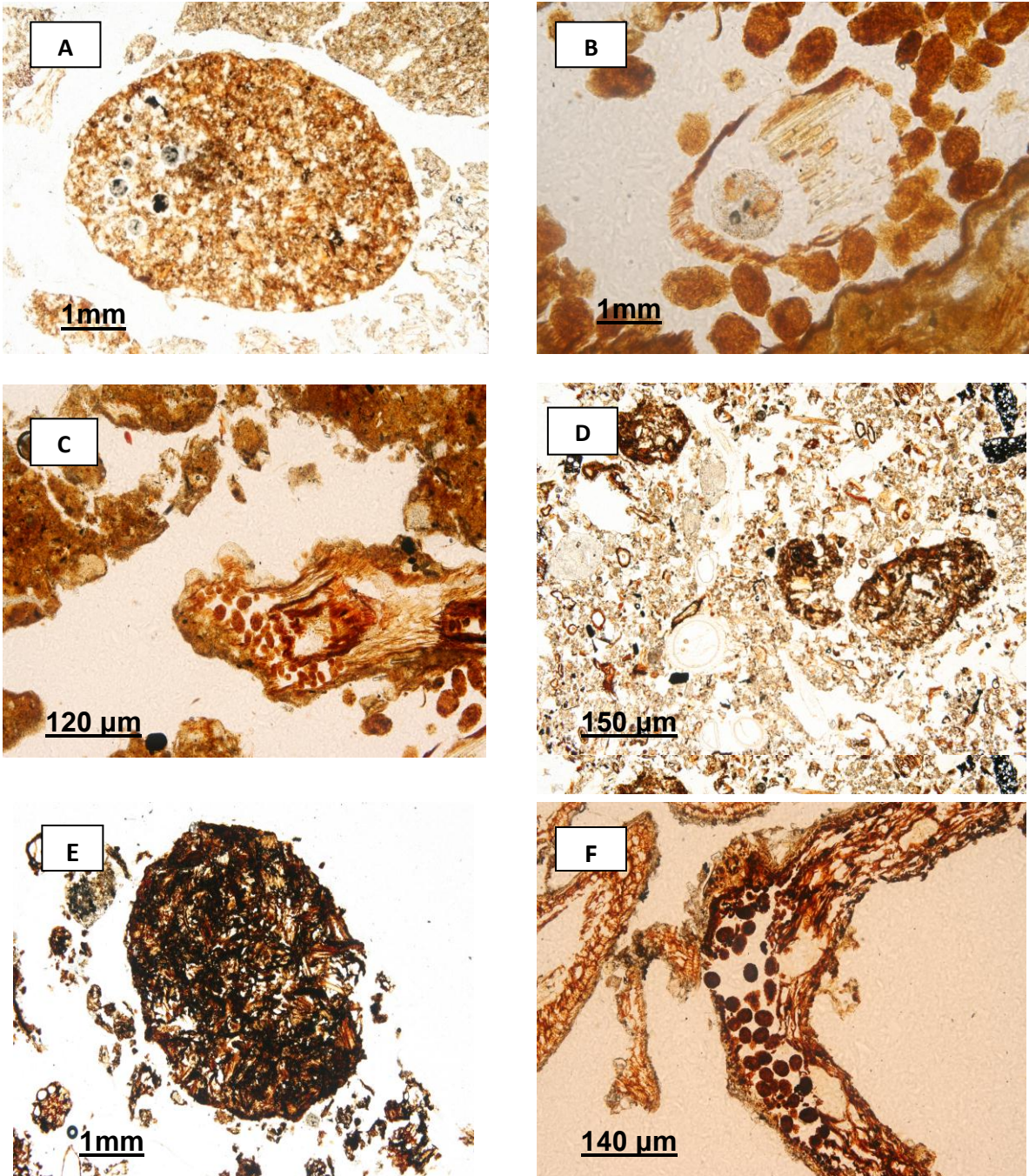
A diferencia de las especies anteriormente mencionadas, *Pinus montezumae*, *Pinus teocote* y *Cupressus lusitanica* tienen de manera general, microestructura de tipo migajosa, granular y bloques subangulares, sin embargo, la única especie que presentó de tipo laminar, fue *Cupressus lusitanica* (figura 9B,C), lo cual significa que hay procesos de sedimentación en el perfil 1 de ésta, a pesar de no tener prácticamente pendiente (8%); presentan porosidad, en promedio, 25-30%; tipo de poro de empaquetamiento compuesto, empaquetamiento complejo, cavidad, vesicular y fisura; raíces completas (Figuras 11A-E), excepto *Pinus teocote* y; restos de raíces, también en caso de *Eucalyptus globulus* (figura 11F). Algo importante por comentar es que *Pinus montezumae* y *Cupressus lusitanica* muestran evidencias de incendio forestal, por tener restos de hojas mineralizadas (Figura 12F), aunque en menor proporción *Cupressus lusitanica* (Figura 12 E).

En lo que respecta a los poros, aproximadamente la mitad del volumen de suelo es espacio poroso. El tamaño, la forma y la continuidad de los poros determinan en gran medida el movimiento del aire y agua en el suelo, y las características de los poros en cierto modo están determinadas por la estructura (Buol et al., 1998).



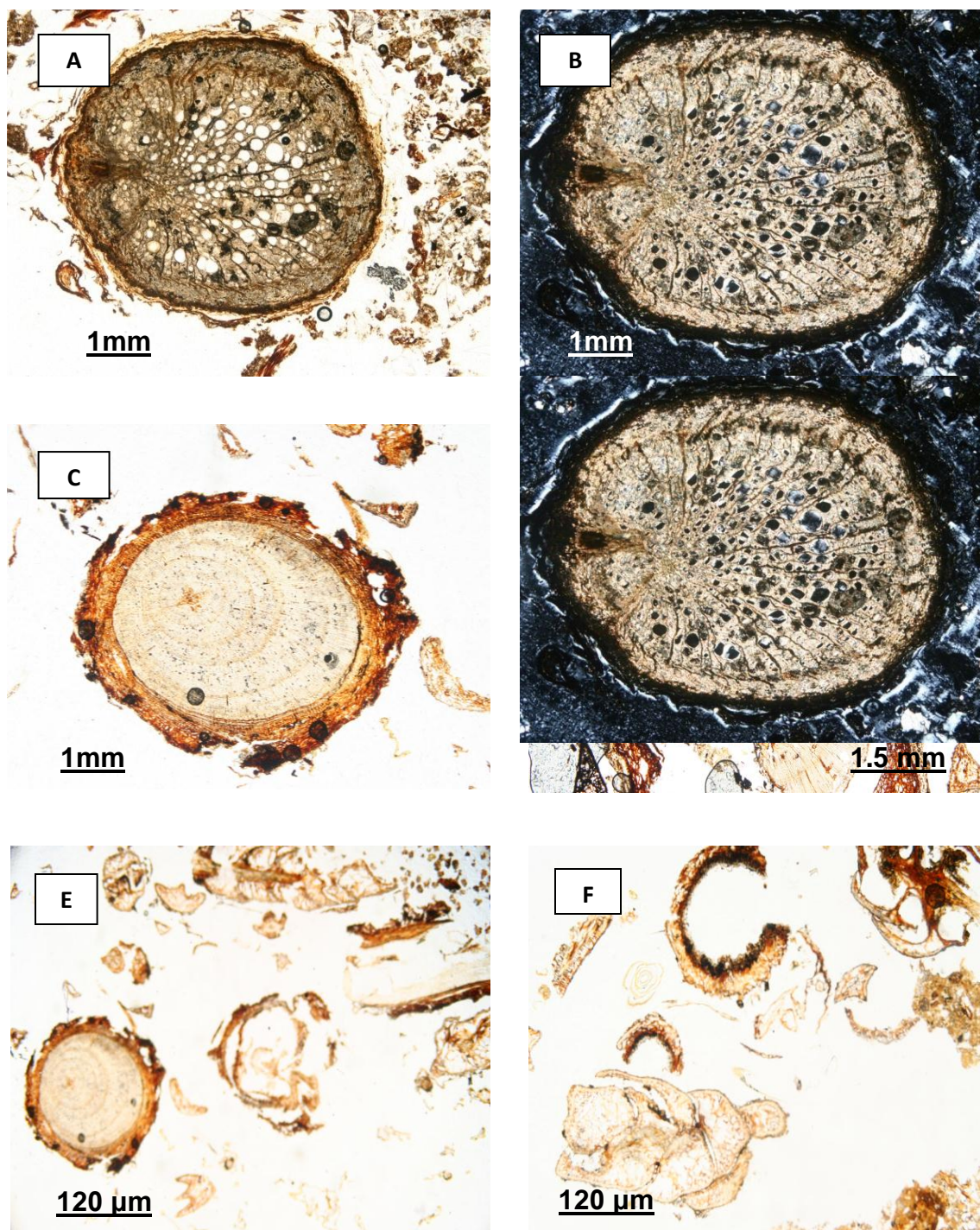
**Figura 9. Microestructura de las diferentes especies forestales.**

- A) Estructura migajosa con moderado a fuerte desarrollo de *Casuarina equisetifolia*.
- B) Estructura migajosa con fuerte desarrollo con un conjunto de raíces completas en *Cupressus lusitánica*.
- C) Estructura laminar con fuerte desarrollo en *Cupressus lusitánica*.
- D) Estructura laminar con raíces introducidas en su interior en *Cupressus lusitánica*.
- E) Estructura granular (apedal) y estructura migajosa con moderado a fuerte desarrollo en *Eucalyptus globulus*.
- F) Estructura de bloques subangulares con moderado desarrollo en *Pinus teocote*.



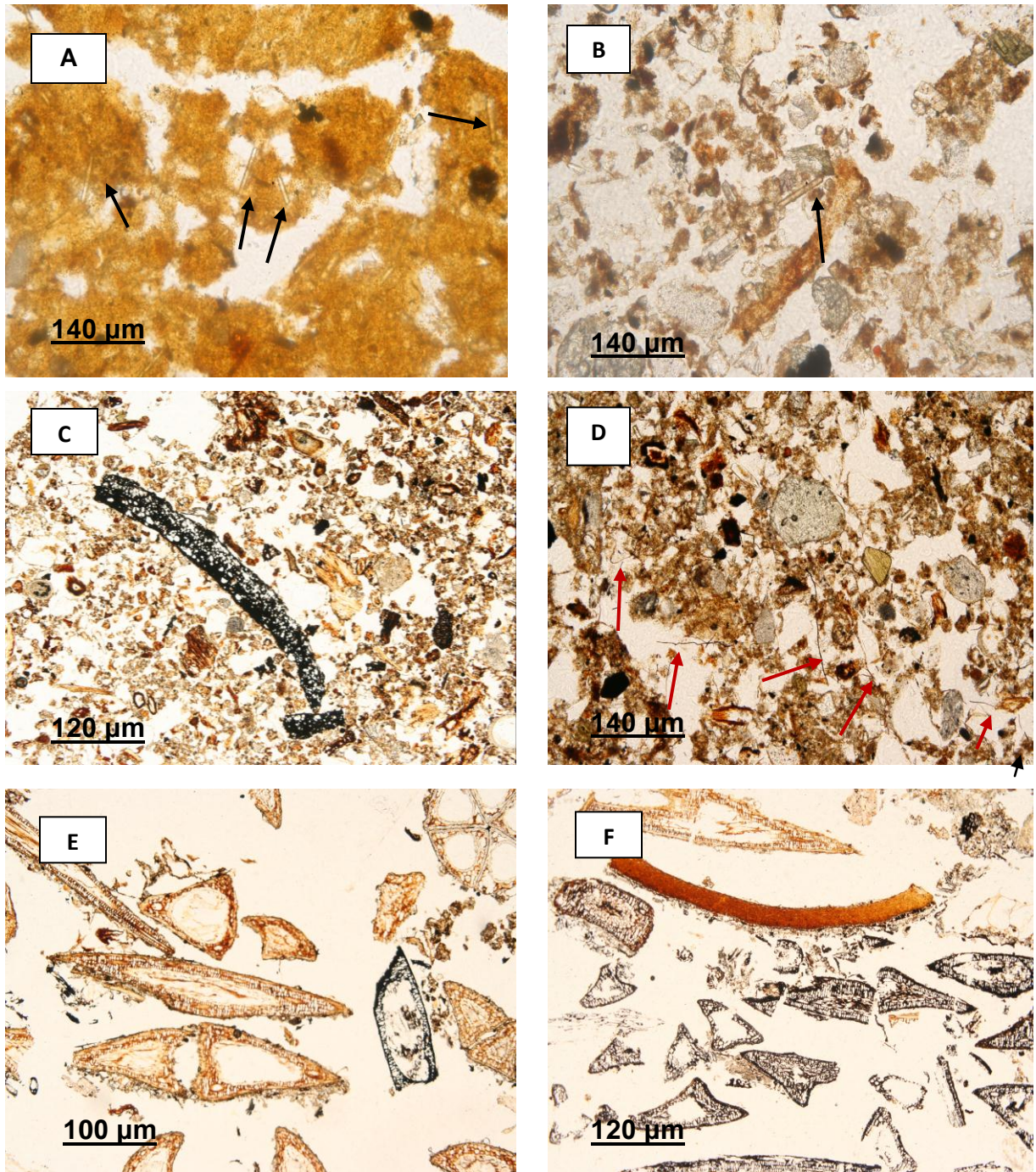
**Figura 10. Tipos de excremento presentes en las diferentes especies forestales.**

- A) Excremento de mesofauna en *Casuarina equisetifolia*.
- B) Agrupación de excremento de ácaros de color rojo cerca de una raíz de *Cupressus lusitánica*.
- C) Excrementos de ácaros incrustados en el interior de una raíz en *Cupressus lusitánica*.
- D) Excrementos de mesofauna presentes en la microestructura de *Eucalyptus globulus*.
- E) Excremento de mesofauna de tamaño considerable (1mm a 4X) de *Eucalyptus globulus*.
- F) Excrementos de ácaros incrustados en el interior de una raíz de color rojo en *Pinus montezumae*.



**Figura 11. Componentes orgánicos en las diferentes especies forestales.**

- A) Raíz con diferenciación de tejidos (xilema, floema, colénquima y parénquima) de *Casuarina equisetifolia*, en luz plana.
- B) Raíz con diferenciación de tejidos (xilema, floema, colénquima y parénquima) de *Casuarina equisetifolia*, en luz cruzada.
- C) Raíz con diferenciación de tejidos (xilema, floema, colénquima y parénquima) de *Cupressus lusitánica*.
- D) Raíz con clara diferenciación de tejidos en *Pinus mmontezumae*.
- E) Raíz Completa y restos de las mimas con microestructura migajosa con fuerte desarrollo en *Cupressus lusitánica*.
- F) Raíces fragmentadas en sus tejidos de *Eucaptyptus globulus*.



**Figura 12. Componentes orgánicos en las diferentes especies forestales.**

- A) Fitolitos que se visualizan en la microestructura (migajosa con débil desarrollo) de *Cupressus lusitanica*.
- B) Fitolito presente en la microestructura (migajosa con moderado desarrollo) de *Eucalyptus globulus*.
- C) Restos de una raíz mineralizada, lo que indica un incendio forestal en el sitio de estudio en *Eucalyptus globulus*.
- D) Hifas delgadas contenidas en la microestructura (migajosa y granular con moderado a fuerte desarrollo) de *Eucalyptus globulus*.
- E) Restos de raíces con clara diferenciación de tejidos (una de ellas mineralizada, indicando a su vez incendio forestal en el sitio de estudio) de *Cupressus lusitanica*.
- F) Restos de hojas mineralizadas, reflejando la existencia de incendio forestal en el sitio en donde habita *Pinus montezumae*.



### 6.6 Estimación de conductividad hidráulica haciendo comparación por especie.

La prueba T es un tipo de análisis el cual permite hacer comparaciones con datos mínimos (3) en contraste con otro tipo de pruebas, tales como homogeneidad de varianzas de Bartlett u otras. Al aplicar la prueba T a los datos de la kfs (conductividad hidráulica saturada) a diferente profundidad por especie, hubo una alta diferencia significativa entre especies, diferencia significativa, mientras que en otras no la hubo (cuadro 6). Cabe destacar que en el caso de *Cupressus lusitánica* hubo dos muestreos, se detectó una marcada diferencia al hacer los cálculos en relación a su profundidad, motivo por el cual se cita dos veces.

**Cuadro 6.** Prueba de T para la plantación en diferentes especies forestales.

Plantación/especies	<i>Cupressus 2</i>	<i>Eucalyptus</i>	<i>Casuarina</i>	<i>Pinus t.</i>	<i>Pinus m.</i>
<i>Cupressus 1</i>	0,012148 **				
<i>Cupressus 1</i>		0,025692 *			
<i>Cupressus 1</i>			0,038037 *		
<i>Cupressus 1</i>				0,035335 *	
<i>Cupressus 1</i>					0,427912 ns
<i>Cupressus 2</i>		0,076834 ns	0,176917 ns	0,004509 **	0,255465 ns
<i>Eucalyptus</i>			0,127844 ns	0,004563 **	0,249838 ns
<i>Casuarina</i>				0,064254 ns	0,274322 ns
<i>Pinus t.</i>					0,318578 ns

\* Significativo a 5%, \*\* Altamente significativo a 1%, ns = no significativo

El suelo es un sistema de tres fases: sólido, líquido y gaseoso, y cuatro componentes mineral, orgánico, agua y aire. Un buen suelo para el crecimiento de un cultivo, tendrá 45 % en volumen de materia mineral, 5 % de materia orgánica y 50% de espacio poroso dividido aproximadamente en 25 % de agua y 25% de aire. Es importante notar que aproximadamente la mitad del volumen es espacio poroso (Purves, *et al.* 2000). De manera particular, las propiedades hidráulicas afectan considerablemente las fases (gaseosa y líquida) del suelo, además de la accesibilidad, almacenamiento y flujo de nutrientes, definiendo por ende las condiciones de vida de los microorganismos, modificando éstos la descomposición del mismo (Lipiec *et al.*, 2009).

Al respecto Lipiec *et al.*, (2009), hicieron un estudio acerca de la relación que existe entre la compactación del suelo y su conductividad hidráulica saturada, encontrando una notable compactación del suelo, la cual depende de las interacciones entre el nivel de compactación, el tamaño total de los agregados y la profundidad del suelo; factores que afectan su conductividad hidráulica al no existir un espacio poroso adecuado que permita su percolación

Considerando que el funcionamiento hidrológico de los bosques primarios y ecosistemas agrícolas se conoce en cierta medida, el impacto de los bosques secundarios sobre el ciclo hidrológico todavía no ha recibido la misma atención. Beate *et al.*, (2006) consideraron lo anterior para realizar su estudio, evaluando los efectos de la regeneración de los bosques sobre la hidrología del suelo e investigaron los efectos del uso de la tierra y la cubierta vegetal de *Tectona grandis*, pastos y platano; además de los tipos de áreas deforestadas de la cuenca del Amazonas, calculando trayectorias de flujo por infiltrabilidad, para lo cual cuantificaron sobre el terreno la conductividad hidráulica saturada (Ksat) a dos profundidades (12,5 y 20 cm) debajo de bosque primario. Inferieron posibles cambios en el régimen de paso de flujo hidrológico con la intensidad de las lluvias predominantes, puesto que a 20 cm de profundidad, las diferencias en Ksat entre los usos de la tierra son menores en comparación con prevalecientes intensidades de lluvia, es decir, el flujo vertical de agua se ve impedida, independientemente del uso del suelo. Concluyeron que hay un efecto considerable, por lo que cualquier evaluación del funcionamiento hidrológico de los bosques secundarios, natural o por el hombre, debe tener en cuenta el tipo, intensidad y duración de uso de la tierra antes de rebrote.

## **VII. CONCLUSIONES**

Las Casuarinas (especie introducida) y los Cedros (especie nativa) son las especies forestales que más están contribuyendo a la formación de suelos por lo que no tiene ninguna relación su origen. Ambas especies están cumpliendo con todas las funciones del suelo por lo que se recomiendan en las reforestaciones en tepetates rojos.

Los Pinos (*especie nativa*) su influencia en la formación de suelos es menor y por lo tanto su capacidad de almacenamiento de agua. Este tipo de plantaciones no se recomiendan si el objetivo es la recarga de los mantos acuíferos en tepetates rojos en el área de estudio.

Los Eucaliptos como planta introducida están formando suelo; no obstante, tienden a acidificarlo y a reducir la cantidad de bases intercambiables necesaria para la nutrición de las plantas. Este tipo de plantaciones están integrados de manera moderada al ecosistema al cumplir parcialmente en algunas de sus funciones.

## VIII. LITERATURA CITADA

- Adame M. S. y Gómez G. A. 1999. Cartografía y Evaluación de las reforestaciones en la zona oriente de la cuenca de México. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Aguilar R. S. y Barajas M. J. (2005) *Anatomía de la madera de especies arbóreas de un Bosque Mesófilo de Montaña: un enfoque ecológico-evolutivo*. Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F. Botánica estructural 77:51-58.
- Aguilera H. Nicolas. 1989. Tratado de edafología. Tomo I. Facultad de Ciencias. México. 225 p.
- Alfaro S. G., Oleschko K. y Meza S. M. 1992. Rasgos micromorfológicos de los tepetates de Hueyoxtla (Estado de México). TERRA Vo. 10. Número Especial: Suelos Volcánicos Endurecidos. Órgano Científico de la Sociedad Mexicana del Suelo, A.C. Colegio de Postgraduados. Primer Simposio Internacional México 20-26 de octubre 1991.pp. 253-258.
- Álvarez D., J., R. Ferrera C. y J. D. Etchevers B. (2000) Actividad microbiana en tepetates con incorporación de residuos orgánicos. *Agrociencia* 34: 523-532.
- Andéké-Lengui y Dommergues, (1983) Coastal dune stabilization in Senegal. En: Midgley, S.J.; Turnbull, R.D.; Johnston, R.D., eds. *Casuarina* ecology, management and utilization: Proceedings of a workshop; 1981 August 17-21; Canberra, Australia. Melbourne: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization: 158-166.).
- Arias, R. H., García, T. G. 1992. Evaluación de la reforestación sobre tepetates en la zona oriente de la cuenca de México. TERRA Vo. 10. Número Especial: Suelos Volcánicos Endurecidos. Órgano Científico de la Sociedad Mexicana del Suelo, A.C. Colegio de Postgraduados. Primer Simposio Internacional México 20-26 de octubre 1991. Pp. 430-436.
- Ashton, M.; C. Gunatilleke; B. Singhakumara y I. Gunatilleke. 2001. Restorat pathways for rain forest in southwest Sri Lanka: a review of concepts and models. *For. Ecol. Manage.* 525: 1-23.
- Ávila, H. M. 1963. Recuperación de suelos erosionados de Chapingo, México con plantaciones forestales. Tesis M.C. Rama de Suelos. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- Ayala I. J. L., Valdez I. J. H., Terrazas T., J. Valdez. L. R. (2006) *Anillos de crecimiento y su periodicidad en tres especies tropicales del Estado de Colima, México*. Mayo. *Agrociencia* 40: 533-544.

- Báez, A., E. Ascencio Z., C. Prat y A. Márquez. (1997) Análisis del comportamiento de cultivos en tepetate T3 incorporado a la agricultura de temporal, Texcoco, México. In: Tercer simposio Internacional: Suelos Volcánicos y Endurecidos. Zebrowski, C, Quantin, P y Trujillo, G. (eds). ORSTOM. Quito, Ecuador. Pp: 296-310.
- Báez P. A. (2001) Dinámica del carbono orgánico en tepetates cultivados. Tesis. Colegio de Postgraduados. Texcoco, México.
- Bandyopadhyay, A.K. 1986. *Casuarina equisetifolia* grows well in heavy-textured coastal saline soils. Indian Farming. 36(5): 19.
- Baver, L. D., Gardner, W. H., Gardner, W.R. 1980. Física de suelos. 2a. edición. México. Ed. UTEHA. 529 p.
- Biondi F. (2001) *A 400-year tree-ring chronology from the tropical treeline of North America*. Ambio 30:162–166.
- Biondi F., Gershunova. and Cayan R. D. (2001) *North Pacific Decadal Climate Variability since 1661*. Letters. American Meteorological Society. Vol. 14:5-10 pp.
- Bone, R.; M.Lawrence y Z. Magombo. 1997. The effect of an *Eucalyptus camaldulensis* (Dehn) plantation on native woodland recovery on Ulumba Mountain, southern Malawi. For. Ecol. And Manage. 99: 83-99.
- Bouriaud, O., Leban, J.M., Bert, D., Deleuze, C. (2005) *Intra-annual variations in climate influence growth and wood density of Norway spruce*. Tree Physiol. 25, 651–660.
- Brady, N.C. y Weil, R. R. 1999. The nature and properties of soils. Prentice Hall. Twelfth edition. United States of America.883 p.
- Brunstein FC (1996) *Climatic significance of the Bristlecone Pine latewood frost-ring record at Almagre Mountain, Colorado, USA*. Arc Alp Res 28(1):65–76.
- Buckman, H. O. and N. C. Brady. 1991. Naturaleza y propiedades de los suelos. UTCHA y Grupo Noriega Editores. México. 590 p.
- Bullock, P.; Fedoroff, N.; Jongerius, A.; Stoops, G. and Tursina, T. 1985. Handbook for soil thin section description. Wayne Research Publications, England.
- Buol S.W., Hole F.D., McCracken R.J. 1998. Génesis y Clasificación de Suelos. Ed Trillas. México. 417 p.
- Calderón, P. N., Jasso M. J., Martínez H. J. J., Vargas H. J., Gómez G. A. 2006. Estimulación temprana del crecimiento del epicotilo en plántulas de *Pinus montezumae* Lamb. Ra Ximhai. 2: 847-864.
- Camargo, R. E. O. y Acosta, I.G. 1987. Roturación y trituración de tepetate en el Valle del Mezquital. Su efecto en la agricultura bajo condiciones de riego, pp. 143-155. In: J. F.

- Ruíz F. (ed) Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural. UACH. Chapingo, México.
- Caujolle, G. A. y C. Luzuriaga. 1986. Estudio de un tipo de cangahua en el Ecuador. Posibilidades de mejoramiento mediante el cultivo. Documentos de investigación n° 6, pp. 59-67, MAG. Quito, Ecuador.
- Ceballos J. R. 2002. *Los árboles, seres vivos para la ciencia*. Departamento de Geografía, Universidad de Zaragoza. España. 2: 1-16.
- Ceccon, E. y M. Martínez R. 1999. Aspectos ambientales en plantaciones forestales de eucalipto. *Interciencia*. Nov-Dic. 24(6): 352-359.
- CATIE. 1991. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. *Casuarina equisetifolia* L. ex J.R. Forst. & G. Forst., árbol de uso múltiple en América Central. Rep. 173, Tech. Series. Turrialba, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. 51 p.
- Cherubini P, Gartner B.L., Tognetti R., Bräker O.U., Schoch W., Innes J.L. (2003) *Identification, measurement and interpretation of tree rings in woody species from Mediterranean climates*. *Biol Rev* 78:119–148.
- Child, E. C. 1969. An introduction to the physical basis of soil water phenomena. England. John Wiley & Sons.
- Clemens, J., Campbell, L.C., Nurisjah, S. 1983. Germination, growth and mineral ion concentrations of *Casuarina* species under saline conditions. *Australian Journal of Botany*. 31: 1-9.
- Copenheaver C. A., Elizabeth A. Pokorski, Currie J. E. and Marc D. A. (2006) *Causation of false ring formation in Pinus banksiana: A comparison of age, canopy class, climate and growth rate*. *Forest Ecology and Management*. December .236:348-355.
- Creus N. J. y Saz. M. A. S. (2004) *La sequía como principal factor limitante del desarrollo de pinus halepensis Mill. En el sector central del Valle del Ebro*. Departamento de Geografía, Universidad de Zaragoza. España.4: 607-617.
- Cuanalo de la C., H. E. (1975) Manual de descripción de perfiles en el campo. Rama de Suelos. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- De la O, G. A. F. y Fierros, G. A. M. 1987. Reforestación en el Valle de México un caso "Barrera Forestal Oriente", Chapingo, México.
- Delgadillo, M. E., M. E. Miranda y B. Ruíz. 1989. Evaluación de seis formas de roturación de tepetate amarillo para incorporarlo a la producción en el oriente de la cuenca de México. Tesis, UACH, Méx.

- Díaz S. C., Touchan R. and Swetnam T. W. (2001) *A tree-ring reconstruction of past precipitation for Baja California Sur, Mexico*. *Int. J. Climatol.* 21: 1007–1019.
- Díaz, S. C., Therrell D. M., Stahle W. D., Cleaveland M.K. 2002. Chihuahua (Mexico) winter-spring precipitation reconstructed from tree-rings, 1647-1992. *CLIMATE RESEARCH*. *Clim Res.* Vol. 22: 237-244. Published November 4.
- Díaz V. J., David W. Stahle, Brian H. Luckman, Julian Cerano-Paredes, Mathew D. Therrell, Malcom K. Cleaveland, Eladio Cornejo-Oviedo. (2007) *Winter-spring precipitation reconstructions from tree rings for northeast Mexico*. *Climatic Change*. Marzo. 83:117-131.
- Eguiluz, P. T. 1988. Distribución natural de los pinos en México. México. Centro de Genética Forestal, A.C. Nota Técnica No. 1.6 p.
- El-Lakany, M.H. 1983. Breeding and improving of casuarina: a promising multipurpose tree for arid regions of Egypt. En: Midgley, S.J.; Turnbull, R.D.; Johnston, R.D., eds. *Casuarina ecology, management and utilization: Proceedings of a workshop; 1981 August 17-21; Canberra, Australia*. Melbourne: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization: 58-65.
- Esbenshade, H.W.; Grainger, A. 1980. The Bamburi reclamation project. *International Tree Crops Journal*. 1(2/3): 199-202.
- Esper J., Shiyatov S. G., Mazepa V. S., Wilson R. J. S., Graybill D. A. and Funkhouser G. (2003) *Temperature-sensitive Tien Shan tree ring chronologies show multi-centennial growth trends*. *Climate Dynamics* 21: 699–706.
- Etchevers J.D.B., López R.R.M., Zebrowski C., Peña D.H. 1992. Características químicas de tepetates de referencia de los Estados de México y Tlaxcala, México.
- Etchevers J.D.B. y Brito H. (1997) Levantamiento nutricional de los tepetates de México y Tlaxcala. *In: Tercer simposio Internacional: Suelos Volcánicos y Endurecidos*. Zebrowski, C., Quantin, P y Trujillo, G. (eds). ORSTOM. Quito, Ecuador. Pp: 202-212.
- Evans L.T. 1983. Casuarina: An Adaptable Resource. *In: Casuarina Ecology, Management and utilization. Proceedings of an International Workshop, Canberra, Australia*. 17-21 August. Editors: Midgley S. J., Trurnbull J. W., Johnston R.D. Ed. CSIRO.
- Fahn, A. (1974) *Anatomía Vegetal*. H. Blume Ediciones. Madrid.
- FAO. 1990. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. El dilema del eucalipto. Roma. 26 p.
- Ferrera C., R., A. Ortiz, J. Delgadillo y S. Santamaria. (1997) Uso de la materia orgánica en la recuperación de tepetates y su influencia en los microorganismos. *In: Tercer Simposio Internacional: Suelos Volcánicos y Endurecidos*. Zebrowski, C, Quantin, P y Trujillo, G. (eds). ORSTOM. Quito, Ecuador. Pp: 408-414.

- Figuroa, S. B. 1975. Pérdidas de Suelo y nutrientes y su relación con el uso del suelo en la Cuenca del Río Texcoco. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. ENA. Chapingo. México.
- Figuroa S. B., y Morales F. F. J. 1992. Manual de producción de cultivos con labranza de conservación. Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Colegio de Postgraduados. CREZAS. México. P. 272.
- Filion L., Payette S., Gauthier L., Boutin Y. (1986) *Light rings in subarctic conifers as a dendrochronological tool*. *Quat Res* 26:272–279.
- Foth H.D. & Turk L. M. 1980. Fundamentos de la ciencia del suelo. 4ª edición. México. 356 p.
- Frankerberger. W. T., Thoeh, F. R., Dumenil, L. C. 1979. Bacterial effects on hydraulic Conductivity of soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* Pp. 333-338.
- Fritts H.C. (1976) *Tree rings and climate*. *Laboratory of Tree-Ring Research*. Academic Press. Tomo II. 245 pp.
- Fritts H.C. & Swetnam T.W. (1986) *Dendroecology: A tool for Evaluating Variations in Past and Present Forest Environments*. Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, Tucson, AZ, USA.
- Gama-Castro J., Solleiro-Rebolledo E., Flores-Román D., Sedov S., Cabadas-Báez H. y Díaz-Ortega J. 2007. Los tepetates y su dinámica sobre la degradación y el riesgo ambiental: el caso del Glacis de Buenavista, Morelos. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. Tomo LIX. No. 1. Pp. 133-145.
- García, E. (1968) *Los climas del Valle de México*. Colegio de Postgraduados, Escuela Nacional de Agricultura, Chapingo, Estado de México. 63 p.
- Geldenhuis, C. 1997. Native forest regeneration in pine and eucalypt plantations in Northern Province, South Africa. *For. Ecol. Manage.* 99: 101-115.
- Gibson, Ch. 1996. Los Aztecas bajo el dominio español, 1519-1810: Editorial Siglo XXI, S.A. de C.V., 13ª edición, México, D.F.
- González, R. J. M. 1981. La producción de maíz para grano y forraje en tepetates recuperados mediante una práctica mecánica sencilla. Tesis prof. Depto. De Zootecnia. UACH, Chapingo, México.
- González, E. M., Jurado E., Navar, J. M. S. González, E. J. Villanueva, O. A. (2005) *Tree-rings and climate relationships for Douglas-fir chronologies from the Sierra Madre Occidental*. *Forest Ecology and Management*. November. 213:39-53.
- Gourlay, I. D. (1995) *Growth ring characteristics of some African Acacia species*. *J. Trop. Ecol.* 11: 121-140.



- Grubb, P. J. 1995. Mineral nutrients and soil fertility in tropical rainforests. *In*: Lugo, A. E. y Lowe C. (eds), *Tropical Forest Management and Ecology* Springer New York, 308-330 p.
- Guariguata, M.; R. Rheingans y F. Montagnini. 1995. Early wfor forest restoration. *Restor. Ecol.* 3: ood invasion under tree plantations in Costa Rica: Implications for forest restoration. *Restor Ecol.* 3: 52-260.
- Gutiérrez, C. Ma. Del Carmen. 1988. Estudio Micromorfológico de los cementantes de algunos tepetates del Valle de México y Tlaxcala. Tesis . Colegio de Potsgraduados. Texcoco, México.
- Gutierrez-Castorena, y Ortiz-Solorio, C.A., 1992, Caracterización del tepetate blanco en Texcoco, México: *TERRA*, 10, 202-209.
- Gutiérrez C. Ma. Del Carmen, Ortiz S. C. A. y Sánchez G. P. 2003. Edafología General. Génesis, Clasificación y Cartografía. Colegio de Postgraduados. Instituto de Recursos Naturales. Texcoco, México. 1-6 p.
- Gutiérrez C. Ma. Del Carmen, Ortiz S. C. A. y Sánchez G. P. 2007. Clay coatings formation in tepetates from Texcoco, Mexico. Soil Science Programme, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, México.
- Harrold, L. L., G. O. Schwab and B. L. Bondurant. 1974. *Agricultural and Forest Hidrology.* Agr. Enginnering. Deapartment. Ohio State University. Columbus, Ohio.
- Hernández Xolocotzi, E. 1987. Etnobotánica de Tlaxcala, pp. 1-8. *In*: J. F. Ruíz F. (ed). *Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural.* UACH, Depto. Suelos México.
- Herrera, N. M. T. 1977. Métodos para determinar la conductividad hidráulica "K". Tesis prof. UACH, Chapingo, México.
- Hidalgo, C., Quantin P., Zebrowski, C., 1992, La cementación de tepetates: estudio de la silicificación: *TERRA* 10, 192-201.
- Hurtado, G. 1985. Radiación. Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras. Himat. Colombia.
- Iraolagoitia, I. and Ruíz, U. E. (2003) *Dendroclimatología: el árbol como testigo del pasado climático.* *Revista Euskonews & Media*, 204. zbk (2003/03/21-28).
- Jeneau J. L., Jerome G. y Miranda M. E. 1992. Evolución estrcutral de suelos con tepeates. Colegio de Postgraduados. *TERRA* Vol. 11. México. Pp 376-378.
- Kohke, H. 1972. *Soil Physics.* New York, USA., MC Graw-Hill. 244 p.
- Kuo, M., McGinnes Jr., E.A., (1973). *Variation of anatomical structure of false rings in eastern redcedar.* *Wood Sci.* 5, 205–210.

- Kuusipalo, J.; A. Goran; Y. Jafarsidik; A. Otsamo. 1995. Restoration of natural vegetation in degraded *Imperata cylindrica* grassland: understory development in forest plantations. *J. Veg. Sci.* 6: 205-210.
- LaMarche VC, Hirschboeck KK (1984) *Frost rings in trees as records of major volcanic eruptions*. *Nature* 307:121–128.
- Le Roux, P.J. (1974) Establishing vegetation in saline soil to stabilise aeolian sand at Walvis Bay, South West Africa. *Forestry in South Africa*. 15: 43-46.
- Lemenih M., Olsson M., Karlton E. (2004) Comparison of soil attributes under *Cupressus lusitanica* and *Eucalyptus saligna* established on abandoned farmlands with continuously cropped farmlands and natural forest in Ethiopia. *Forest Ecology and Management* Vol. 195. 57–67 pp.
- Liang C., Fillion L., Cournoyer L. (1997) *Wood structure of biotically and climatically induced light rings in eastern larch (Larix laricina)*. *Can J For Res* 27:1538–1547.
- Lipiec J., A. Wójciga, R. Horn. 2009. Hydraulic properties of soil aggregates as influenced by compaction. *Soil & Tillage Research* Vol. 103. Pp. 170–177.
- Llerena V. F. A., Sánchez B. B. (1992) Recuperación de tepetates en la vertiente oriental del Valle de México. *TERRA* Vo. 10. Número Especial: Suelos Volcánicos Endurecidos. Órgano Científico de la Sociedad Mexicana del Suelo, A.C. Colegio de Postgraduados. Primer Simposio Internacional México 20-26 de octubre 1991.pp. 303-308.
- Lugo, A. 1997. The apparent paradox of reestablishing species richness on degraded lands with tree monocultures. *For. Ecol. Manage.* 99: 9-19.
- Maheut, J.; Dommergues, Y. (1959) Fixation par le reboisement des dunes de la presqu'île du Cap-Vert et l'évolution biologique des sols. *Bois et Forêts des Tropiques*. 63: 3-16.
- Malik, M.N.; Sheikh, M.I. (1983) Planting of trees in saline and waterlogged areas. Part 1: Test planting at Azakhel. *Pakistan Journal of Forestry*. 33(1): 1-17.
- Martinelli N. (2003) *Climate from dendrochronology: latest developments and results*. *Global and Planetary Change* 40: 129–139.
- Martínez, R. R.; H. S. Azpiros R.; J. L. Rodríguez de la O.; V. M. Cetina A. Y M. A. Gutiérrez E. 2006. Importancia de las plantaciones forestales de *Eucalyptus*. *Ra Ximhai*. 2 (3): 815-846.
- Metcalfe C.R. y Chalk L. (1989) *Anatomy of the Dicotyledon*. Vol. II. 2a ed. Clarendon Press, Oxford.
- Midgley, S.J.; Turnbull, J.W.; Hartney, V.J. 1986. Fuelwood species for salt affected sites. *Reclamation and Revegetation Research*. 5(1/3): 285-303.

- Mielich G. (1992) Formation and properties of tepetate in the Central highlands of Mexico. TERRA. Vol. 10. Número Especial: Suelos Volcánicos Endurecidos.
- Montoya, O. J. M. 1995. El eucalipto. Ed. Mundi-Prensa. España. 195 p.
- Mooser, F. L. y Rodríguez M. 1960. Plano geológico de la cuenca del Valle de México. Comisión Hidrológica del Valle de México. Secretaría de Recursos Hidráulicos, México, D.F.
- Mosiño, P. A. 1966. Factores determinantes del clima en la República Mexicana, con referencia especial a las zonas áridas. Instituto de Antropología e Historia. Departamento de Prehistoria. 19, México. 45-78 p.
- Murphy, C.P., 1986: *Thin section preparation of soils and sediments*. A.B. Academic Publishers, Berkshamsted, England, 149 p.
- Navarro G., H y D. Floires S. (1997) Manejo agronómico diferencial de la asociación maíz-haba en tepetate de quinto año de uso agrícola. *In*: Tercer Simposio Internacional: Suelos Volcánicos y Endurecidos. Zebrowski, C, Quantin, P y Trujillo, G. (eds). ORSTOM. Quito, Ecuador. Pp: 287-295.
- Navarro G. H., Pérez O. A., Flores S. D. 2004. Productividad del tepetate con sistemas rotacionales. TERRA Latinoamericana, Vol. 22, Núm. 1, pp. 71-79.
- Oros N. D. 2008. Diversidad vegetal en el sotobosque de plantaciones comerciales de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados. Texcoco, México.
- Ortiz V., B., y C. Ortiz A. 1995. Edafología. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, Estado de México. Pp: 135-138.
- Ortiz S.C.A. 1999. Los levantamientos etnoedafológicos: Colegio de Postgraduados, Montecillo, México, Tesis de Doctor en Ciencias.
- Panshin A.J. y De Zeeuw C. (1970) *Textbook of Wood Technology*. Vol. I. McGraw-Hill. New York.
- Parrotta, J.; J. Turnbull y N. Jones. 1997. Catalyzing native forest clearing on groundwater. J. Hydrology. 94: 47-65.
- Peck, A. J. y D. R. Williamson. 1987. Effects of forest clearing on groundwater. J. Hydrology. 94: 47-65.
- Pedraza, C. E., Rodríguez F. y Fierros E. 1987. Establecimiento de cinco especies forestales en tres tipos de tepetate de la zona de Tequexquinahuac a Coatepec. UACH. Chapingo, México.

- Peña H.D y Zebrowski C. 1992. Caracterización física y mineralógica de los tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada. TERRA. Vol. 10. Número Especial: Suelos Volcánicos Endurecidos.
- Peña H.D., Miranda, M.E., Zebrowski, C. y Arias, M. H., 1992, Resistencia de los tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada: TERRA, 10, 164-177.
- Pérez, O. A. J. Etchevers., H. Navarro, y R. Nuñez. (2000) Aporte de los residuos del cultivo anterior al reservorio de nitrógeno en los tepetates. Agrociencia 34. Pp 115-125.
- Pimentel B. L. 1992. Como hacer productivos a los tepetates en México. TERRA Vo. 10. Número Especial: Suelos Volcánicos Endurecidos. Órgano Científico de la Sociedad Mexicana del Suelo, A.C. Colegio de Postgraduados. Primer Simposio Internacional México 20-26 de octubre 1991.pp. 303-308.
- Porta C.J., López A.R. M., Roquero D. C. 1999. Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente. Ed. Mundi-Prensa. España. 849 p.
- Prat, C. y A. Báez (1998) Condiciones de habilitación agrícola en toba volcánica endurecida (tepetate) en México. In: 16 Congreso Mundial de la Ciencia del Suelo. Registro científico no. 2547, simposio no. 38 8CD-ROM). Montpellier, Francia.
- Priya, P.B., Bhat, K.M. (1998) *False ring formation in teak (Tectona grandis L.f.) and the influence of environmental factors*. Forest Ecol. Manage. 108, 215–222.
- Quantin, P., 1992, L'induration des matériaux volcaniques pyroclastiques en America Latine: processus géologiques et pédologiques: TERRA, 10: 24-33.
- Rey, C. J. A. 1979. Estimación de la erodabilidad de los tepetates en la cuenca del Río Texcoco en base al factor K. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Reynolds W.D. y Elrick D.E. 1985. In situ measurements of field saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the parameter using the Guelph permeameter. Soil science 140: 292-302.
- Rivera R. Pedro. 1996. Determinación del Potencial Hidrológico en Tepetates Tipo T3 con lluvia simulada. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco.
- Rozas V. (2004) *Efectos de la historia del dosel y el clima sobre los patrones de crecimiento radial de Fagus sylvatica L. y Quercus robur L.* Invest Agrar: Sist Recur For 13 (3), 479-491.
- Rubio D.L. & McCarthy B.C. (2004) *Comparative analysis of dendroecological methods used to assess disturbance events*. Dendrochronologia. 21:97-215.
- Ruiz F., J. F. (1987) Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural. Ruiz F., F. (ed). Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo. Estado de México.

- Rugama, U. J. A. 1997. Evolución estructural del tepetate T3, producto de la roturación y manejo agrícola. Tesis prof. Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, México.
- Russell J. E. y Russell P. E. 1988. Las condiciones del suelo y el crecimiento de las plantas. 4ª edición. España. 894 p.
- Santana, J. C. (1999) *Primeros Resultados para la Reconstrucción Dencroclimática de Canarias*. *Vegueta*. 4: 9 -25.
- Schweingruber F. H. (1993) *Trees and wood in Dendrocronology*. Germany.
- SARH. 1990. Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Comisión Nacional de Agua. Proyecto Lago de Texcoco. Evaluación del Programa de Reforestación del Proyecto Lago de Texcoco. Instituto de Estudios, Investigaciones y Servicios AGRIFEFOR, Chapingo, S. C. Diciembre.
- Serre-Bachet and Tessier (1989) Response Function Analysis for Ecological Study. In: Cook R. & Kairiukstis L.A. (eds). *Methods of Dendrochronology*. Klumer Academic Publishers, International Institute for Applied Systems Analysis, Boston.
- Sociedad Española de Ciencias Forestales (S.E.C.F.) (2005) *Diccionario Forestal*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, Barcelona. México.
- Soil Survey Taxonomy. 2010. Claves para la Taxonomía de Suelos. Traducido por: Ortiz S. Carlos. A., Gutiérrez C. Ma. Del Carmen, Hernández L. A. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). Natural Resorces Conservation Service (NRCS).
- Stahle D.W. 1990. *The tree-ring record of false spring in the southcentral USA*. PhD thesis, Arizona State University, Tempe.
- Stahle D.W., Villanueva J., Cleaveland M.K., Therrel M.D. and 5 others. 2000. Recent tree-ring research in Mexico. In: Roig FA (ed) *Dendrocronología en América Latina*. Editorial de la Universidad Nacional de Cuyo (EDIUNC), Mendoza, Argentina, p 285-306.
- Stephens. S. K. Y M.R. Wagner. 2007. Forest plantations and biodiversity: A fresh perspective. *Journal of Forestry*. Vol. 105 (6) 307-313.
- Stokes M. A. and T.L. Smiley. (1996) *An introduction to Tree-Ring Dating*. University of Arizona Press. Tucson, Az.
- Szeicz J.M. (1996) *White Spruce light rings in northwestern Canada*. *Arc Alp Res* 28:184–189.
- Thaiutsa, Bunvong. 1990. Estimating productivity of *Casuarina equisetifolia* grown on tin-mine lands. En: El-Lakany, M.H.; Turnbull, J.W.; Brewbaker, J.L., eds. *Advances in*

- casuarina* research and development. Actas de un taller; 1990 January 15-20; Cairo, Egypt. Cairo: Desert Development Center, American University in Cairo: 94-101.
- Tovar, T A. 1987. Determinación del efecto de aplicación de estiércol de bovino semiseco y fresco sobre el rendimiento de cebada en suelos erosionados, pp. 156-171. In: J. F. Ruiz F. (ed). *Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural*. UACH. Chapingo, México.
- Treter, U., Block, J., Kastner, R. (2002) *Dendrochronology and dendroecology results from larch forests in northwestern Mongolia high steppes*. *Stuttgarter Geographische Studien* 133, 83–98.
- Trouet V., Coppin P. and Beeckman H. (2006) *Annual Growth Ring Patterns in Brachystegia spiciformis Reveal Influence of Precipitation on Tree Growth*. *Biotropica* 38(3): 375–382.
- Turnbull J. W. & Pryor L. D. 1989. Choice of species and seed sources. In: *Eucalypts of wood production*. CSIRO/Academic Press. Hillis W. E., Brown A. G. (eds). Australia. 6-63 p.
- Turnbull, J. W.; S. J. Midgley y C. Cossalter. 1997. Tropical acacias planted in Asia: an overview. *ACIAR Proceedings*. 82 (14-28). CIFOR.
- Valdez, L. 1970. Características morfológicas y mineralógicas de los suelos de tepetate de la cuenca de México. Tesis. Colegio de Postgraduados, México.
- Van Lill. W. S.; F. G. Kruger y D. B. Van W. 1980. The effect of forestation with *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden and *Pinus patula* Schelt et Cham, on streamflow from experimental catchments of Makobulaan, Transvall. *Journal of Hydrology*. 48: 107-18.
- Van Reeuwijk, L. P. 2003. Procedimientos para análisis de suelos. Trad. al español por M.C. Gutiérrez C., C. A. Tavarez E. y C. A. Ortiz S. Colegio de Postgraduados. Montecillo, estado de México.
- Villanueva D. J. (1996) *Influence of land-use and climate on soils and forest structure in mountains of the Southwestern United States and Northern Mexico*. Ph. D. Dissertation. University of Arizona, Tucson, 2003 p.
- Villanueva D. J. & McPherson G. R. (1996) *Reconstruction of precipitation and PDSI from tree-ring chronologies developed in mountains of New Mexico, USA and Sonora, Mexico*. *Hydrology and Water Resources in Arizona and the Southwest*. Hydrology Section, Arizona Nevada Academy of Science 26:45–54.
- Villanueva D.J y Cerano P.J. (2004) *Elementos básicos de la dendrocronología y sus aplicaciones en México*. INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias). Folleto Técnico No. 2 Julio.

- Volney W.J.A., Mallet K.I. (1992) *Light rings and the age of jack pine trees*. Can J For Res 21:2201–2013.
- Werner, G. 1992. Suelos Volcánicos Endurecidos (Tepetates) en el estado de Tlaxcala: Distribución, Rehabilitación, Manejo y Conservación. TERRA Vo. 10. Número Especial: Suelos Volcánicos Endurecidos. Órgano Científico de la Sociedad Mexicana del Suelo, A.C. Colegio de Postgraduados. Primer Simposio Internacional México 20-26 de octubre 1991. Pp. 318-331.
- Wiles C. G., Parker E. Calkin, Gordon C. Jacoby. (1996) *Tree-ring analysis and Quaternary geology: Principles and recent applications*. Geomorphology 16:259-272.
- Wimmer R. y Grabner M. (2000) *A comparison of tree-ring features in Picea abies as correlated with climate*. IAWA Journal, Vol. 21 (4) pp. 403– 416.
- Worbes M. 2004. *Tree-Ring Analysis*. Elsevier Ltd. Göttingen, Germany. Pp. 13.
- Xiaoniu X., Qin W., Eiji H. (2005) *Precipitation partitioning and related nutrient fluxes in a subtropical forest in Okinawa, Japan*. 245 Ann. For. Sci. 62 pp. 245–252.
- Xu, Y.Q.; Long, W.B. 1983. The adaptive character and species choice of main planting trees of farmland shelterbelt in the Pearl River delta. Scientia Silvae Sinicae. 19(3): 225-234.
- Yadav, J.S.P.; Banerjee, S.P.; Bandola, K.C. 1977. Soil characteristics of coastal alluvium supporting *Casuarina equisetifolia* in Maharashtra and Gujarat. Fertilizer Technology (India). 14(3): 208-213.
- Yamaguchi D.K., Fillion L., Savage M. (1993) *Relationship of temperature and light ring formation at subarctic treeline and implications for climate reconstruction*. Quat Res 39:256–262.
- Zamorado, O. A. R. 1994. Grado de aceptación de los Programas de Reforestación en el área de influencia del Proyecto Lago Texcoco. División de Ciencias Forestales. Chapingo, México.
- Zebrowski, C. 1992. Los Suelos Volcánicos endurecidos de América Latina. TERRA Vo. 10. Número Especial: Suelos Volcánicos Endurecidos. Órgano Científico de la Sociedad Mexicana del Suelo, A.C. Colegio de Postgraduados. Primer Simposio Internacional México 20-26 de octubre 1991.pp. 16-23.
- Zimmermann B., H. Elsenbeer, J. M. De Moraes. 2006. The influence of land-use changes on soil hydraulic properties: Implications for runoff generation. Forest Ecology and Management 222: 29–38 pp.

## IX. APÉNDICE

### DESCRIPCIÓN DEL SITIO 1

**Descrito por:** Gabriela R. Ávila C.  
2010

**Fecha:** 11 de Febrero de

**Localidad:** Huexotla, Texcoco, Estado de México.

**Coordenadas:** Latitud Norte 19°27' 00.1" y Longitud Oeste 98° 48' 47.9"

**Altitud:** 2572 m  
pendiente.

**Relieve:** plana

**Pendiente:** 3% de

**Drenaje superficial:** sitio normal  
andesítica

**Material parental:** Toba

**Vegetación:** Eucaliptos y pastizal sobre la superficie del perfil, cobertura discontinua (60%).

**Condiciones meteorológicas:** húmedo.  
Ústico

**Régimen de humedad:**

### DESCRIPCIÓN DEL PERFIL 1



Horizonte	Descripción
Oi	0-8 cm, litter de hojas de Eucalipto y hojas de pasto en ligera descomposición.
A	8-21 cm, color en seco gris oscuro (10YR 4/1) y en húmedo pardo (10 YR 5/3); textura arenosa; ligeramente húmedo; estructura migajosa, fuertemente desarrollada, muy fina; consistencia friable; no pegajosa; no plástica; permeabilidad rápida; raíces finas y delgadas, comunes; ligera reacción al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , no calcáreo; transición al siguiente horizonte, horizontal y tenue (por dureza).
Bw	21-38 cm, color en seco pardo oscuro grisáceo (10YR 4/2) y en húmedo pardo pálido (10 YR 6/3); textura franco arcillosa; húmedo; estructura bloques subangulares de 2 a 4 cm, fuertemente desarrollada; consistencia ligeramente dura; pegajosa; plástica; permeabilidad lenta; raíces gruesas y raras; moderada reacción al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , no calcáreo; transición al siguiente horizonte, horizontal y tenue (por dureza).
Bw <sub>2</sub>	38-64 cm, color en seco pardo oscuro (10YR 4/3) y en húmedo pardo (10 YR 5/3); textura franco arcillosa; húmedo; estructura estructura bloques subangulares de 3 a 5 cm, fuertemente desarrollada; consistencia ligeramente dura; pegajosa; plástica; permeabilidad lenta; raíces medias y delgadas, comunes; fuerte reacción al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , no calcáreo.



## DESCRIPCIÓN DEL SITIO 2

**Descrito por:** Gabriela R. Ávila C.  
2010

**Fecha:** 11 de Febrero de

**Localidad:** Huexotla, Texcoco, Estado de México.

**Coordenadas:** Latitud Norte 19°27' 00.1" y Longitud Oeste 98° 48' 47.9"

**Altitud:** 2572 m  
pendiente.

**Relieve:** regular

**Pendiente:** 5% de

**Drenaje superficial:** sitio receptor  
andesítica

**Material parental:** Toba

**Vegetación:** Eucaliptos y pastizal sobre la superficie del perfil, cobertura discontinua (80%).

**Condiciones meteorológicas:** húmedo.  
Ústico

**Régimen de humedad:**

## DESCRIPCIÓN DEL PERFIL 2



Horizonte	Descripción
Oi	0-6 cm, litter de hojas de Eucalipto y hojas de pasto en ligera descomposición.
Bw	6-15 cm, color en seco pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) y en húmedo pardo (10 YR 5/3); textura migajosa; húmedo; estructura poliédrica, fuertemente desarrollada, fina; consistencia dura; no pegajosa; plástica; permeabilidad rápida; raíces finas y medias, comunes; fuerte reacción al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , no calcáreo; transición al siguiente horizonte, ondulada y tenue (por dureza).
Bw <sub>2</sub>	15-42 cm, color en seco pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) y en húmedo pardo pálido (10 YR 6/3); textura franco arcillosa; húmedo; estructura bloques angulares y subangulares de 3 a 6 cm, fuertemente desarrollada; consistencia dura; pegajosa; plástica; permeabilidad moderada; raíces finas y raras; fuerte reacción al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , no calcáreo; transición al siguiente horizonte, ondulada y tenue (por dureza).
Bw <sub>3</sub>	42-53 cm, color en seco pardo grisáceo (10YR 5/2) y en húmedo pardo grisáceo claro (10 YR 6/2); textura franco arcillosa; húmedo; estructura bloques angulares y subangulares de 5 a 10 cm, fuertemente desarrollada; consistencia dura; pegajosa; plástica; permeabilidad moderada; raíces finas y raras; moderada reacción al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , no calcáreo. Cutanes zonales, espesos en las caras horizontales de los agregados de silicio.

### DESCRIPCIÓN DEL SITIO 3

**Descrito por:** Gabriela R. Ávila C.  
2010

**Fecha:** 11 de Febrero de

**Localidad:** Huexotla, Texcoco, Estado de México.

**Coordenadas:** Latitud Norte 19°27' 00.1" y Longitud Oeste 98° 48' 47.9"

**Altitud:** 2572 m  
pendiente.

**Relieve:** regular

**Pendiente:** 15% de

**Drenaje superficial:** sitio receptor  
andesítica

**Material parental:** Toba

**Vegetación:** Eucaliptos y pastizal sobre la superficie del perfil, cobertura discontinua (80%).

**Condiciones meteorológicas:** húmedo.  
Ústico

**Régimen de humedad:**

### DESCRIPCIÓN DEL PERFIL3



Horizonte	Descripción
Oi	0-1 cm, litter de hojas de Eucalipto y hojas de pasto en ligera descomposición.
Bw	1-15 cm, color en seco pardo oscuro (10YR 3/3) y en húmedo pardo (10 YR 5/3); textura migajosa; ligeramente húmedo; estructura granular, moderadamente desarrollada; consistencia friable; no pegajosa; plástica; permeabilidad rápida; raíces finas y medias, comunes; moderada reacción al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , no calcáreo; transición al siguiente horizonte, ondulada y tenue (por dureza).
Bw <sub>2</sub>	15-41 cm, color en seco pardo oscuro (10YR 3/3) y en húmedo pardo amarillo claro (10 YR 6/4); textura migajón areno arcillosa; húmedo; estructura poliédrica, fuertemente desarrollada; consistencia friable; pegajosa; plástica; permeabilidad rápida; raíces finas y raras; moderada reacción al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , no calcáreo; transición al siguiente horizonte, ondulada y tenue (por dureza).
Bw <sub>3</sub>	41-56 cm, color en seco pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2) y en húmedo pardo amarillo (10 YR 5/4); textura migajón arcillosa; húmedo; estructura de bloques angulares, fuertemente desarrollada de 2-4 cm; consistencia friable; pegajosa; plástica; permeabilidad moderada; moderada reacción al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , no calcáreo.