



EVALUACIÓN DE LAS REFORESTACIONES EN LA FORMACIÓN DE SUELO A PARTIR DE TEPETATES

REFORESTATION ASSESSMENT IN THE FORMATION OF SOIL FROM TEPETATES

Gabriela Rebeca Ávila-Campuzano¹; Ma. del Carmen Gutiérrez-Castorena¹; Carlos A. Ortiz-Solorio¹; Efraín Ángeles-Cervantes²; Patricio Sánchez-Guzmán¹

¹Programa de Edafología, Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, km 36.5 Carretera México- Texcoco, Montecillo, Estado de México, C. P. 56230. Correo-e: carmen.gutierrez.castorena@gmail.com (¹Autor para correspondencia) Correo-e: carmen.gutierrez.castorena@gmail.com

²Laboratorio de Ecología e Hidrología de Bosques, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México. C. P. 09230. MÉXICO.

RESUMEN

Para restaurar la vegetación de los lomeríos con tepetate y enmendar los problemas ambientales, la Comisión del Plan Lago de Texcoco inició en 1973 un programa de conservación del suelo y del agua, a través de la reforestación en la zona de lomeríos y la pastización en las áreas bajas en los terrenos del exLago 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 forestales (cedros, eucaliptos, pinos y casuarinas) sobre áreas con tepetate rojo. Se describieron tres perfiles de suelo por plantación y se realizaron análisis físicos, químicos y micromorfológicos. Los resultados evidencian que tanto las casuarinas como los cedros, son las especies que forman suelo en menos tiempo y favorecen la captación y almacenamiento del agua; mientras que los pinos y eucaliptos, si bien se adaptan favorablemente en estas condiciones ambientales, su influencia en la restauración ambiental es menor.

Recibido: 18 de noviembre de 2010.
Aceptado: 14 de marzo de 2011.
doi:10.5154/r.rchsc/2010.11.113
<http://www.chapingo.mx/revistas>

PALABRAS CLAVE: Texcoco, tepetate, *Cupressus*, *Pinus*, *Casuarina*, *Eucalyptus*.

ABSTRACT

In 1973 the Commission of the Lake Texcoco Plan initiated a soil and water conservation program, through the reforestation of the hilly zone and restoration of the grassland in the low areas in the lands of the former lake bed. It has been 37 years, and there are few studies that assess the direct impact of reforestation on soil formation and the recovery of its functions as part of the ecosystem. The present study was conducted in the eastern part of the State of Mexico, in order to evaluate the impact of different forest plantations (cedar, eucalyptus, pines and casuarinas) on soil formation in a red tepetate area. Three soil profiles were described for each planting, and physical, chemical and micromorphological analyses were carried out. Results show that casuarinas and cedars are the species that contribute the most to soil formation and increase the water retention capacity in the area. Although pines and eucalyptus adapt favorably to these environmental conditions, their influence in environmental restoration is considerably lower.

KEY WORDS: Texcoco, tepetate, *Cupressus*, *Pinus*, *Casuarina*, *Eucalyptus*.

INTRODUCCIÓN

En el Valle de México existen zonas severamente erosionadas, en donde afloran materiales denominados tepetates (Alfaro *et al.*, 1992), que cubren una superficie estimada de 30,700 km² (Zebrowski, 1992; Navarro *et al.*, 2004); este daño se debe a la ausencia de vegetación que incrementa su susceptibilidad a la erosión hídrica, debido a que los tepetates se caracterizan por su dureza, baja porosidad, limitada actividad biológica y bajo nivel de fertilidad, el cual demerita o impide su

INTRODUCTION

In the Valley of Mexico there are severely eroded zones, where there are materials called tepetates (Alfaro *et al.*, 1992) which cover an estimated surface of 30,700 km² (Zebrowski, 1992; Navarro *et al.*, 2004). This damage is due to the absence of vegetation that increases its susceptibility to water erosion, as the tepetates are characterized by their hardness, low porosity, limited biological activity and low fertility level, which demerits or impedes their agricultural use (Gama-Castro *et al.*, 2007). In

uso agrícola (Gama-Castro *et al.*, 2007). Para restaurar la vegetación de los lomeríos y subsanar 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, con la finalidad de controlar el proceso erosivo de los tepetates, y la pastización en las zonas bajas, para evitar las constantes tolvaneas y retener agua para propiciar la recarga de acuíferos (Llerena y Sánchez, 1992; Pimentel, 1992).

Adame (1991) evaluó las reforestaciones de la zona oriente y encontró que las especies con mayor desarrollo fueron *Cupressus lindleyi*, *Pinus montezumae*, *Pinus radiata* y *Pinus michoacana*, sobre todo en tepetates rojos. Sin embargo, no se determinó el grado de desarrollo del suelo y a qué 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).

Cuando un suelo está degradado pierde prácticamente todas sus funciones (Brady y Weil, 1999), ya que la vegetación tiene influencia directa en la meteorización, estructura y porosidad, e indirecta en el almacenamiento y percolación del agua (Porta *et al.*, 1999). No obstante, son escasos los estudios donde se evalúe 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.

El objetivo de la presente investigación fue determinar el impacto de diferentes plantaciones de especies forestales en las propiedades edáficas y formación de los suelos a partir de tepetates rojos en Texcoco, Estado de México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización geográfica

El área de estudio se localiza cerca del poblado de San Miguel Coatlinchán, Estado de México, sobre la ladera occidental del cerro Tlaloc, entre los 19°26' y 19°27' de latitud norte y los 98°48' y 98°52' de longitud oeste (Figura 1). La formación de la cuenca de México data aproximadamente del Terciario Medio (Mooser, 1961). Las rocas que predominan son andesitas, además de corrientes lávicas, estratos de toba y brecha (Valdéz, 1970). El clima (*Cw2(w)bi*) es el más húmedo de los templados, subhúmedo con lluvias en verano (García, 1981). La temperatura media anual del suelo es mayor o igual a 15 °C, pero menor que 22 °C. Los principales suelos en las zonas con obras de recuperación y reforestación son Litosoles y Feozems (Arias y García, 1992).

order to restore the vegetation of the hills and amend the environmental problems, in 1973 the Commission of the Lake Texcoco Plan initiated a program of soil and water conservation through reforestation, to control the erosive process of the tepetates, and restoration of grasslands in the low zones, to prevent the constant dust devils and to retain water to propitiate the refilling of the aquifers (Llerena and Sánchez, 1992; Pimentel, 1992).

Adame (1991) evaluated reforestation of the eastern zone and found that the species with highest development were *Cupressus lindleyi*, *Pinus montezumae*, *Pinus radiata* and *Pinus michoacana*, especially with red tepetates. However, the degree of soil development was not determined, nor at what velocity it was occurring. Without soil it is not possible to capture and store water, and surface runoff and erosion will impede the refilling of the ground water (Gama-Castro *et al.*, 2007).

When a soil is degraded, it loses practically all of its functions (Brady and Weil, 1999), because vegetation has a direct influence on its weathering, structure and porosity, and indirect influence on the storage and percolation of water (Porta *et al.*, 1999). However, there are few studies which evaluate the direct impact of reforestation with different species on soil formation, and hence on the fulfillment of its functions as part of the ecosystem.

The objective of the present study was to determine the impact of different plantations of forest species on the soil properties and formation from red tepetates in Texcoco, State of Mexico.

MATERIALS AND METHODS

Geographic location

The study area is located near the town of San Miguel Coatlinchán, State of Mexico, on the western side of Tlaloc mountain, between 19° 26' and 19° 27' latitude north and 98° 48' and 98° 52' longitude west (Figure 1). The formation of the watershed of Mexico dates from approximately the Middle Tertiary (Mooser, 1961). The rocks that predominate are andesites, along with lava flows, layers of tuff and breccia (Valdéz, 1970). The climate (*Cw2(w)bi*) is the most humid of the temperate climates, sub-humid with rains in summer (García, 1981). The mean annual temperature of the soil is higher than or equal to 15 °C, but lower than 22 °C. The principal soils in the zones with recovery and reforestation work are Lithosols and Feozems (Arias and García, 1992).

Field work

With the aid of satellite images obtained from internet in the site www.google.maps and from field surveys, reforested areas were selected that were dominant, homogeneous, with the same parental material and of di-

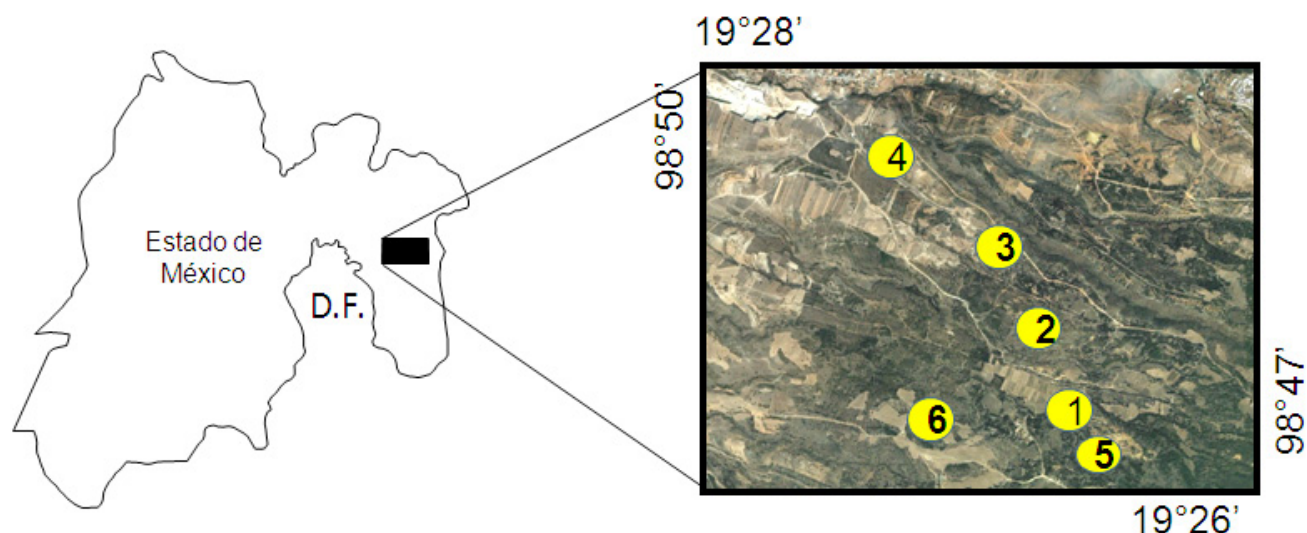


FIGURA 1. Ubicación del área de estudio en el oriente del Estado de México.

FIGURE 1. Location of the study area in the eastern part of the State of Mexico.

Trabajo de campo

A través de imágenes satelitales obtenidas en internet en el sitio www.google.maps y de recorridos de campo, se seleccionaron áreas reforestadas que fueran dominantes, homogéneas, con el mismo material parental y diferente pendiente. Se trabajó con plantaciones de cinco especies forestales, que de acuerdo con la superficie de la plantación estudiada son: *Pinus teocote* Schltl et Cham (7.10 ha), *Cupressus lusitánica* Miller (3.38 ha), *Pinus montezumae* Lamb (3.23 ha), *Casuarina equisetifolia* Forst (1.29 ha) y *Eucalyptus globulus* Labill (1.03 ha). En cada sitio se describieron tres perfiles con base en el manual de Cuanalo (1975), en la parte alta, media y baja de la reforestación. Se colectaron muestras alteradas para los análisis de laboratorio e inalteradas para la elaboración de secciones delgadas. La conductividad hidráulica (*Kfs*) se determinó directamente en campo a través de un permeámetro Guelph 2800K1 con base en la metodología propuesta por Reynolds y Elrick (1985).

Los análisis efectuados fueron: textura, densidad aparente (DAP), pH (agua-suelo relación 2:1), carbono orgánico (CO), capacidad de intercambio catiónico (CIC), porcentaje de saturación de bases (PSB), retención de humedad (a 33 kPa y 1,500 kPa); todas las metodologías fueron extraídas del Manual de Van Reeuwijk (2003). También se determinó el color en seco y en húmedo con la carta de colores Munsell. Las secciones delgadas se realizaron de acuerdo con el método de Murphy (1985) y se describieron con base en el trabajo de Bullock *et al.* (1985).

Finalmente, para establecer la edad de las plantas y por tanto de las plantaciones se colectaron núcleos vegetales de cada una de las especies arbóreas de acuer-

fferent slope, Plantings of five forest species were used, which according to the surface of the plantation under study are: *Pinus teocote* Schltl et Cham (7.10 ha), *Cupressus lusitánica* Miller (3.38 ha), *Pinus montezumae* Lamb (3.23 ha), *Casuarina equisetifolia* Forst (1.29 ha) and *Eucalyptus globulus* Labill (1.03 ha). In each site three profiles were uncovered based on the manual of Cuanalo (1975), in the high, middle and low zone of reforestation. Altered samples were collected for the laboratory analysis and unaltered for the elaboration of thin sections. Hydraulic conductivity (*Kfs*) was determined directly in the field by means of a Guelph 2800K 1 permeameter based on the methodology proposed by Reynolds and Elrick (1985).

The analyses carried out were: texture, apparent density (Dap), pH (water-soil ratio 2:1), organic carbon (CO), cationic exchange capacity (CEC), percentage of saturation of bases (PSB), moisture retention (to 33 kPa and 1,500 kPa); all of the methodologies were extracted from the Manual of Van Reeuwijk (2003). The colors in dry and wet were also determined with the Munsell color chart. The thin sections were made according to the method of Murphy (1985) and were described based on the work of Bullock *et al.* (1985).

Finally, to establish the age of the plants and thus of the plantations, vegetable nuclei were collected of each one of the arboreal species according to Grissino-Mayer (2003); next, the visible rings were marked (Stahle *et al.*, 2000), and the anomalies were eliminated to avoid errors in the determination of their age (Kuo and McGuinness, 1973). In species such as *Casuarina* and *Eucalyptus*, it was difficult to observe the rings, so it was necessary to consult in the SARH (1990) on the historic register of the plantations.

do con Grissino-Mayer (2003); después se les marcaron los anillos visibles (Stahle *et al.*, 2000), y las anomalías fueron eliminadas para evitar errores en la determinación de su edad (Kuo y McGinnes, 1973). En especies como Casuarina y Eucaliptos fue difícil la observación de anillos, por lo que se tuvo que consultar en la SARH (1990) sobre el registro histórico de las plantaciones.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las plantaciones forestales en la formación de suelos

En el Cuadro 1 se reportan los horizontes genéticos y las propiedades edáficas de un perfil de cada especie forestal. Los resultados de este trabajo mostraron que las especies forestales influyen de diferente manera en la formación del suelo. En todas las plantaciones ocurre un horizonte orgánico (2-8 cm de espesor) con ligera descomposición (Oi), además del horizonte A. No obstante, el espesor y subdivisiones entre horizontes varían con el tipo de reforestación, sobre todo en las plantaciones de casuarinas y cedros. En estas plantaciones, la acumulación de carbono orgánico (de 6 hasta 81 %) en los horizontes superficiales y la mineralización hasta 35 cm de profundidad, además de la presencia abundante de raíces, generaron un horizonte A con dos subdivisiones (A1 y A2). Diversos autores mencionan que la incorporación de los materiales orgánicos humificados en el suelo es la responsable de la formación de los horizontes A (Porta *et al.*, 1999); además, es el principal vínculo entre el suelo y las plantas, ya que ahí se concentran los nutrimentos (Chadwick y Graham, 2000).

En las plantaciones de pinos y eucaliptos la influencia de la acumulación de CO es menor que en cedros y casuarinas. Los horizontes Bw que ocurren en estas plantaciones, no se formaron como resultado de la actividad de las especies forestales sino que constituyen al suelo original, y por procesos de erosión o terrazo afloraron a la superficie. Algunos de ellos incluso conservan sus características diferenciadoras (estructura y color) en la superficie, como en el caso de los eucaliptos, lo que indica su poca influencia en la formación de procesos edáficos (Foss *et al.*, 1983). Finalmente, se tiene a los horizontes C o a las transiciones AC, que ocurren principalmente en las plantaciones de pinos, que significa poca influencia en la formación de suelos (Soil Survey Staff, 2010).

En cuanto a las propiedades edáficas de las diferentes plantaciones, se encontró que las texturas francas se presentan en las plantaciones de casuarinas, las gruesas en las de pinos y las más finas en las de los cedros; estas diferencias están relacionadas con el tipo de material parental que afloró durante la formación de la terraza (SARH, 1990). La densidad aparente es más

RESULTS AND DISCUSSION

Forest plantations in soil formation

In Table 1 the genetic horizons are reported along with the soil properties in a profile of each forest species. The results of this work showed that the forest species influenced soil formation differently. In all of the plantations there is an organic horizon (2-8 cm thickness) with light decomposition (Oi), in addition to horizon A. However, the thickness and subdivisions among horizons vary according to the type of reforestation, especially in the plantations of casuarinas and cedars. In these plantations, the accumulation of organic carbon (from 6 to 81 %) in the superficial horizons and the mineralization up to 35 cm depth, in addition to the abundant presence of roots, generated an A horizon with two subdivisions (A1 and A2). Diverse authors mention that the incorporation of humified organic materials in the soil is responsible for the formation of the A horizons (Porta *et al.*, 1999); furthermore, it is the principal link between the soil and the plants, given that the nutriments are concentrated there (Chadwick and Graham, 2000).

In the plantations of pine and eucalyptus the influence of the accumulation of CO is lower than in cedars and casuarinas. The Bw horizons that occur in these plantations did not form as a result of the activity of the forest species, but rather constitute the original soil, and from processes of erosion or terracing outcrop on the surface. Some of them even conserve their differentiating characteristics (structure and color) on the surface, as in the case of the eucalyptuses, which indicates that they have little influence on the formation of soil processes (Foss *et al.*, 1983). Finally, there are the C o horizons to the AC transitions, which mainly occur in the pine plantations, which indicates little influence on the formation of soils (Soil Survey Staff, 2010).

With respect to the soil properties of the different plantations, it was found that the loamy textures appear in the casuarina plantations, coarse in those of pine and the finest in those of cedar; these differences are related to the type of parental material that outcropped during the formation of the terrace (SARH, 1990). The apparent density is lower in the superficial horizons (from 0.34 to 1.32 g·cm⁻³) and increases up to 1.7 g·cm⁻³ in the unaltered tepetate, as a result of the pedogenetic process (Brady and Weil, 1999). The highest percentage of moisture retention (60-70 %) occurs in the plantations of cedars with respect to those of other species (between 20-40 %). This percentage may be related with the presence of fine textures in the forest plantations and with the accumulation of organic matter (Baldock and Nelson, 2000). Finally, for the pH and the exchangeable bases it was found that in the eucalyptus plantations and

CUADRO 1. La formación de suelos a partir de tepetates y la caracterización de algunas propiedades físicas y químicas.
TABLE 1. Soil formation from tepetates and the characterization of some physical and chemical properties.

Horizonte Genético	Profundidad (cm)	cm por año	COLOR (10YR)		TEXTURA	DAP (gcm ⁻¹)	HUMEDAD		pH	% CO	CIC cmolk ⁻¹	Na cmolk ⁻¹	K cmolk ⁻¹	Ca cmolk ⁻¹	Mg cmolk ⁻¹	PSB
			Seco	Húmedo	Clase textural		CC (%)									
<i>Eucaliptus globulus</i>																
Oi	8-0	1.73	5/3	4/1	Franco arenoso	1.03	34.4	6.0	7.9	23.5	0.22	0.28	9.57	1.58	49.5	
A	0-13		6/3	4/2	Arena Francosa	1.06	22.7	4.9	1.3	9.8	0.22	0.22	1.61	1.30	34.1	
Bw	13-30		5/3	4/3	Franco arcillo arenoso	1.66	26.4	5.8	0.9	18.2	0.42	0.24	10.77	3.14	80.1	
Bw ₂	30-56		6/2	4/3	Arcilla	1.87	57.3	6.0	0.7	62.3	0.55	0.41	24.72	6.23	51.2	
Oi	6-0	1.43	5/4	3/2	Franco arcillo arenoso	0.88	ND	5.2	10.1	82.4	0.31	0.48	22.11	3.07	31.5	
Bw	0-9		5/4	3/2	Franco arcillo arenoso	1.47	ND	5.1	1.9	62.5	0.17	0.28	5.01	2.09	12.1	
Bw ₂	9-36		6/3	3/2	Arcilla	1.54	ND	6.0	1.0	65.7	0.31	0.26	13.86	3.85	27.8	
Bw ₃	36-47		6/2	5/2	Arcilla	1.85	ND	6.2	0.7	79.2	0.22	0.11	11.12	3.36	18.8	
Oi	1-0	1.14	6/4	5/3	Franco arenoso	1.29	23.4	4.9	6.4	32.5	0.20	0.31	3.55	1.17	16.1	
Bw	0-14		5/3	3/3	Franco	1.11	23.8	4.6	1.7	22.0	0.17	0.22	1.48	1.46	15.1	
Bw ₂	14-26		6/4	3/3	Franco arenoso	1.24	19.0	5.2	1.3	17.1	0.17	0.23	4.13	1.76	36.8	
Bw ₃	26-41		5/4	4/2	Franco	1.30	26.9	6.0	1.3	18.6	0.44	0.32	11.56	1.80	75.8	
<i>Casuarina equisetifolia</i>																
Oi	5-0	0.86	4/1	4/2	-	0.58	51.6	5.4	38.6	56.7	0.22	1.04	50.17	3.58	97.0	
A	0-6		3/3	5/3	Arena francosa	1.53	14.9	5.2	1.2	13.3	0.18	0.38	8.78	2.07	86.1	
Bw	6-16		4/2	5/3	Franco arenoso	1.53	14.3	5.0	1.1	12.0	0.22	0.32	6.93	2.08	79.7	
Bt	16-27		4/2	5/3	Franco arcillo arenoso	1.60	21.9	5.8	0.9	15.6	0.18	0.23	9.55	3.65	87.1	
Oi	4,5-0	1.51	3/2	4/2	Franco arcillo limoso	1.11	65.2	5.9	19.3	46.0	0.25	1.40	49.98	6.71	100.0	
A	0-6,5		5/3	3/3	Arcilla	1.48	35.6	5.4	8.1	26.1	0.18	0.37	14.06	3.35	68.8	
A ₂	6,5-28,5		5/3	4/2	Franco arcilloso	1.64	28.4	5.6	1.4	19.0	0.22	0.22	10.58	3.80	77.8	
C	28,5-51,5		6/3	4/2	Franco arcillo arenoso	1.63	21.4	5.9	0.8	16.3	0.18	0.19	8.61	3.33	75.7	
Oi	5-0	1.68	3/3	3/2	-	0.48	59.2	5.6	22.3	54.1	0.14	1.02	44.94	5.82	95.8	
A	0-8		6/3	3/4	Arcillo limoso	1.30	37.0	5.4	6.0	33.0	0.14	0.56	11.50	3.33	47.1	
A ₂	8-14		6/4	3/4	Franco arcillo limoso	1.33	36.0	5.4	6.6	28.5	0.14	0.39	8.07	3.22	41.5	
Bw	14-23		5/3	4/2	Arcillo limoso	1.27	37.7	5.4	2.8	26.8	0.16	0.33	11.10	4.24	59.2	
Bw ₂	23-36		6/3	5/3	Arcilla	1.72	34.9	5.6	1.3	31.9	0.22	0.28	11.36	4.30	50.7	
Bw ₃	36-57		6/2	5/2	Arcilla	1.73	34.5	5.9	0.9	30.4	0.25	0.33	12.43	4.45	57.4	
<i>Pinus montezumae</i>																
Oi	2-0	0.85	4/2	3/2	-	0.50	68.2	5.0	7.3	38.7	0.22	1.02	34.63	6.77	100.0	
Ac	0-17		7/3	5/4	Franco arcillo arenoso	1.58	31.4	6.3	0.7	25.9	0.31	0.98	32.76	7.45	100.0	
2C	17-21		7/4	6/6	Franco arenoso	1.43	41.8	6.5	0.8	55.0	0.44	1.15	26.04	3.00	55.7	
Oi	2-0	0.67	4/2	3/2	Franco	1.43	53.7	6.2	7.3	38.9	0.22	0.85	32.05	3.15	93.1	
Bw	0-8		7/2	7/6	Arena Francosa	1.53	37.6	6.6	2.6	49.2	0.38	1.21	38.48	9.14	100.0	
C	8-16		8/2	8/6	Arena	1.61	42.3	7.7	0.5	46.7	0.71	1.16	38.08	7.33	100.0	
Oi	2-0	1.44	4/2	3/2	Franco limoso	0.32	92.6	5.8	12.8	38.9	0.14	0.92	33.93	4.83	100.0	
A	0-21		8/3	6/4	Arena francosa	1.46	41.0	6.7	1.7	39.2	0.22	0.78	25.69	4.64	80.02	
AC	21-37		8/3	6/4	Arena	1.46	43.0	7.5	0.4	48.6	0.40	0.95	29.96	6.33	77.5	
<i>Pinus teocote</i>																
Oi	2-0	0.68	4/2	3/2	Franco	1.23	37.0	6.9	5.4	38.5	0.29	0.77	34.31	6.37	100.0	
A	0-15		8/4	5/4	Arena Francosa	1.10	38.3	7.2	0.6	40.0	0.20	0.37	21.48	3.86	64.7	
Oi	0,5-0	0.46	6/2	5/2	Franco arenoso	1.31	38.4	6.5	3.2	38.9	0.31	0.57	35.91	11.99	100.0	
AC	0-6,5		6/2	6/3	Arena francosa	1.60	30.5	6.9	0.7	49.0	0.49	0.61	42.04	10.16	100.0	
Oi	3-0	0.68	5/4	4/4	Franco arenoso	1.40	46.7	7.2	4.1	47.3	0.22	0.66	26.61	3.57	65.7	
A	0-14		7/4	6/4	Arena francosa	1.35	49.9	7.8	1.1	47.7	0.25	0.97	36.74	5.48	91.0	
<i>Cupressus lusitánica</i>																
Oi	2-0	0.61	4/2	3/2	-	0.40	73.7	5.7	41.2	51.1	0.20	0.71	22.77	5.86	57.7	
A	0-10		7/6	4/4	Arcillo limoso	1.16	53.7	6.1	1.0	61.4	0.38	0.56	10.33	3.57	24.1	
C	10-18		7/4	5/4	Arcilla	1.24	57.0	6.6	0.8	56.7	0.84	0.67	11.23	3.72	29.0	
Oi	2-0	1.39	5/4	4/3	Arcillo limoso	1.11	61.1	5.6	17.2	69.8	0.33	0.85	15.51	4.02	29.6	
A	0-3		7/6	4/4	Franco arcilloso	1.03	62.6	6.0	1.1	71.3	1.28	0.70	14.46	4.39	29.2	
A ₂	3-24		7/6	4/6	Franco arcilloso	1.04	72.7	6.5	0.6	51.8	1.39	0.47	9.52	3.10	27.9	
C	24-44		6/6	5/6	Franco arcilloso	1.07	60.2	6.7	0.5	47.1	1.57	0.53	9.21	2.95	30.3	
Oi	5-0	2.48	5/2	4/2	-	1.32	45.7	6.5	2.6	41.9	0.22	1.65	26.01	5.74	80.1	
A	0-35		7/3	5/3	Franco arcillo arenoso	1.83	38.8	6.8	0.6	34.7	0.27	1.01	27.45	6.02	100.0	
AC	35-77		7/6	4/6	Franco arcillo arenoso	1.35	48.1	6.8	0.4	37.0	0.31	2.54	29.27	5.02	100.0	
Oi	1-0	0.39	4/1	3/1	-	1.23	80.0	6.9	81.4	74.3	0.20	1.52	31.62	4.98	51.6	
AC	0-12		3/4	5/6	Arcilla	1.34	48.5	6.2	1.0	48.4	0.18	1.53	10.29	2.29	29,558	

baja en los horizontes superficiales (de 0.34 a 1.32 g·cm⁻³) y se incrementa hasta 1.7 g·cm⁻³ en el tepetate inalterado, como resultado del proceso pedogenético (Brady y Weil, 1999). El mayor porcentaje de retención de humedad (60-70 %) ocurre en las plantaciones de cedros en comparación con las de otras especies (entre 20-40 %). Este porcentaje puede estar relacionado con la presencia de texturas finas en las plantaciones forestales y con la acumulación de materia orgánica (Baldock y Nelson, 2000). Finalmente, para el pH y las bases intercambiables se encontró que en las plantaciones de eucaliptos y las de casuarinas ocurren en suelos con un pH de 5-5.9, con PSB menores de 50, por lo que están generando que se lave y acidifique el suelo, ya que el tepetate rojo original tiene un pH alcalino 7.5 (Etchevers *et al.*, 1992). En el caso de las plantaciones de pinos y cedros presentan diferentes reacciones (5.0 a 7.8), con PSB incluso hasta de 100 %. Brady y Weil (1999) indican que los pinos tienden a acidificar el suelo al no reciclar el Ca²⁺ y el Mg²⁺, por lo que las diferencias en comportamiento deben estar relacionadas con la naturaleza del material parental y con las condiciones climáticas (Boul *et al.*, 1997). La CIC es en general irregular debido al diferente contenido, tipo y grado de descomposición de la materia orgánica y clase textural (Porta *et al.*, 1999). El color del suelo en casuarinas y eucaliptos (horizontes O y A) es más oscuro tanto en seco como en húmedo en las plantaciones, debido a que el proceso de melanización es más intenso; mientras que en los cedros resulta insignificante por sus colores claros (Boul *et al.*, 1997). Estas diferencias en la biodegradación pueden estar relacionadas con la composición química de la materia orgánica, la cual está determinada por la cantidad de ligninas (Porta *et al.*, 1999).

Con base en sus propiedades físicas y químicas se puede indicar que las casuarinas y los eucaliptos están formando un epipedón úmbrico, mientras que los pinos y los cedros un epipedón mólico (Soil Survey Staff, 2010), por lo que algunos perfiles coinciden con la clasificación reportada por Arias y García (1992).

Generalmente, las plantaciones de Casuarina se desarrollan en suelos de texturas arenosas (Malik y Sheikh, 1983; Midgley *et al.*, 1986; Xu y Long, 1983); aunque en la zona de estudio crecen en texturas medias con pendientes terrazadas.

Análisis micromorfológico

Las plantaciones que presentan mayor actividad biológica son las de casuarina, debido a que tienen el mayor porcentaje de microestructura migajosa y granular (de 25-35 %) y alto porcentaje de poros de empaquetamiento compuesto (65-70 %) (Figura 2); en contraste con las plantaciones de pinos y cedros. Además, la actividad de microorganismos fue diferente de acuerdo

those of casuarina, they occur in soils with a pH of 5-5.9, with PSB lower than 50, thus they are causing the soil to be washed and acidified, given that the original red tepetate has an alkaline pH 7.5 (Etchevers *et al.*, 1992). In the case of the plantations of pines and cedars, they present different reactions (5.0 to 7.8), with PSB of even as much as 100 %. Brady and Weil (1999) indicate that the pines tend to acidify the soil by not recycling the Ca²⁺ and the Mg²⁺, thus the differences in behavior must be related with the nature of the parental material and with the climatic conditions (Boul *et al.*, 1997). The CIC is in general irregular due to the different content, type and degree of decomposition of the organic material and the textural class (Porta *et al.*, 1999). The color of the soil in casuarinas and eucalyptuses (horizons O and A) is darker both dry and wet in the plantations, due to the fact that the melanization process is more intense; while in the cedars it is insignificant due to its light colors (Boul *et al.*, 1997). These differences in biodegradation may be related with the chemical composition of the organic matter, which is determined by the amount of lignins (Porta *et al.*, 1999).

Based on their physical and chemical properties, it can be indicated that the casuarinas and the eucalyptuses are forming an umbric epipedon, while the pines and cedars are forming a mollic epipedon (Soil Survey Staff, 2010), thus some profiles coincide with the classification reported by Arias and García (1992).

Generally, the plantations of Casuarina develop in soils of sandy texture (Malik and Sheikh, 1983; Midgley *et al.*, 1986; Xu and Long, 1983); although in the study zone they grow in medium textures with terraced slopes.

Micromorphological analysis

The plantations that present the highest biological activity are those of casuarina, because they have the highest percentage of crumb and granular microstructure (from 25-35 %) and high percentage of compound packing pores (65-70 %) (Figure 2); in contrast with the plantations of pines and cedars. Furthermore, the activity of microorganisms was different according to the plantation, in casuarinas and eucalyptuses the mesofauna (worms) was dominant, and in the cedars, the mites. The worms modify the soil structure and the stability of the aggregates (Tomlin *et al.*, 1995); whereas the mites play an important role in the decomposition of the organic matter (Coleman and Crossley, 1996), accelerating the decomposition process, through the fragmentation of the organic residue of the litter (Hendrix, 1995). In the pine plantations remains of excrements were not observed. Finally, in pines and cedars fragments of carbonized plants were observed, which indicates the occurrence of a forest fire.

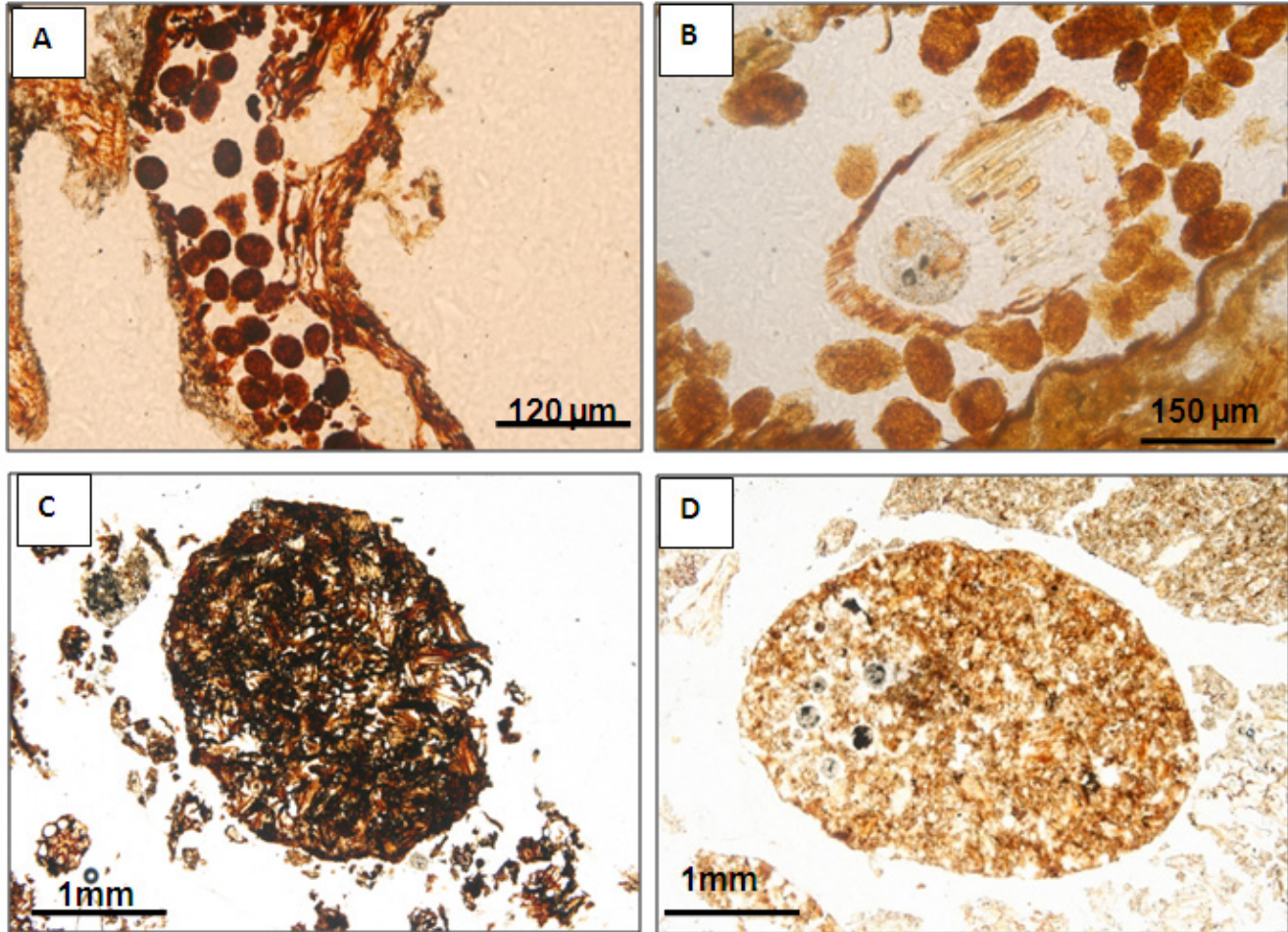


FIGURA 2. Tipos de excrementos: A) pino montezumae, B) casuarina, C) eucalipto y D) cedro.

FIGURE 2. Types of excrements: A) montezumae pine, B) casuarina, C) eucalyptus and D) cedar.

con la plantación: en casuarinas y eucaliptos dominó la mesofauna (lombrices), y en los cedros los ácaros. Las lombrices modifican la estructura del suelo y la estabilidad de agregados (Tomlin *et al.*, 1995); mientras que los ácaros tienen un papel importante en la descomposición de la materia orgánica (Coleman y Crossley, 1996), acelerando el proceso de descomposición, a través de la fragmentación de los residuos orgánicos del litter (Hendrix, 1995). En las plantaciones de pino no se observaron restos de excrementos. Finalmente, en pinos y cedros se observaron fragmentos de vegetales carbonizados, lo cual indica que ocurrió un incendio forestal.

Evaluación de la conductividad hidráulica

Las plantaciones con pinos (teocote y montezumae), cedros y casuarinas incrementan de manera significativa la conductividad hidráulica saturada (Kfs) en aproximadamente 18, 10, seis y tres veces más con respecto al tepetate (0.04517; 0.02512; 0.0159; 0.00707 y 0.00246 cm·seg⁻¹, respectivamente). Por el contrario, los eucaliptos la reducen a 0.00062 cm·seg⁻¹; es decir, cuatro veces menos. Los efectos de las plantaciones

Evaluation of hydraulic conductivity

The plantations with pines (teocote and montezumae), cedars and casuarinas significantly increase the saturated hydraulic conductivity (Kfs) by approximately 18, 10, six and three times more with respect to the tepetate (0.04517; 0.02512; 0.0159; 0.00707 and 0.00246 cm·seg⁻¹, respectively). In contrast, the eucalyptuses reduce it to 0.00062 cm·seg⁻¹; that is, four times less. The effects of the plantations on the Kfs occur in at least 30 years. The above is important if it is considered that reforestation with eucalyptus are the most widely used in soil restoration, so it is recommended that studies be carried out in other regions of the country under in environments that will make it possible to know the magnitude of these results.

The capacity of infiltration of a bare tepetate is an average of 1,083 L·seg⁻¹·ha⁻¹, respectively; that is, 33 and 21 times more than in the outcroppings of tepetate. When these data of infiltration are compared with those reported by García *et al.* (2008), it was found that the plantations of pines and cedars have an infiltration rate

sobre la Kfs ocurren en al menos 30 años. Lo anterior es importante si se considera que las reforestaciones con eucaliptos son las más utilizadas en la restauración de suelos, por lo que se recomienda realizar estudios semejantes en otras regiones del país bajo distintos ambientes que permitan conocer la magnitud de estos resultados.

La capacidad de infiltración de un tepetate desnudo es en promedio de $1,083 \text{ L}\cdot\text{seg}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$; mientras que las áreas reforestadas con *P. montezumae* y cedros infiltran $36,000$ y $23,261 \text{ L}\cdot\text{seg}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$ respectivamente; es decir, 33 y 21 veces más que en los afloramientos de tepetate. Cuando se compararon estos datos de infiltración con los reportados por García *et al.* (2008), se encontró que las plantaciones de pinos y cedros tienen una tasa de infiltración similar a la de un bosque de encinos y a la de una selva baja caducifolia sin perturbar en la reserva de la biosfera Sierra Gorda.

Edad de las plantaciones

Los cedros y los pinos estudiados expresan muy bien la formación de sus anillos, en contraste con los eucaliptos y las casuarinas (Figura 3). Esto se debe a que los primeros corresponden a especies nativas de bosques templados con estacionalidad marcada (López *et al.*, 2006), en tanto que los segundos son especies tropicales de origen australiano con una gran cantidad de lignina, proteína que oscurece la madera (Martínez *et al.*, 2006). Aparentemente los anillos poco definidos indican condiciones severas de sequía (Gourlay, 1995), aunque también depende de la adaptabilidad de la es-



FIGURA 3. Anillos de crecimiento: a) cedro y b) casuarina.

FIGURE 3. Growth rings: a) cedar and b) casuarina.

pecie (Bouriaud *et al.*, 2005); por ejemplo, cedros vs. pinos, bajo las mismas condiciones ambientales.

El análisis de los anillos de crecimiento indica que la edad de las plantaciones para cedros y pinos (*P. montezumae* y *P. teocote*) es de 33, 27 y 25 años, respectivamente. En el caso de los eucaliptos y de las casuarinas, los registros de la SARH (1990) indican que las plantaciones tienen 37 años.

En términos de tasa de formación de suelo (propiedades edáficas, profundidad del suelo y edad de las plantaciones), son los eucaliptos y las casuarinas los más relevantes en la zona (1.43 y 1.35 cm por año en promedio, respectivamente), a diferencia de los pinos

similar to that of an oak forest and of an undisturbed low deciduous forest in the Sierra Gorda biosphere reserve.

Age of the plantations

The cedars and pines studied express very well the formation of their rings, in contrast with eucalyptuses and the casuarinas (Figure 3). This is because the cedars and pines correspond to species native to temperate forests with marked seasonality (López *et al.*, 2006), while the eucalyptuses and casuarinas are tropical species of Australian origin with a high amount of lignin, protein which darkens the wood (Martínez *et al.*, 2006). Apparently the poorly defined rings indicate severe drought conditions (Gourlay, 1995), although it also depends on the adaptability of the species (Bouriaud *et al.*, 2005); for example, cedars vs. pines, under the same environmental conditions.

The analysis of the growth rings indicates that the age of the plantations for cedars and pines (*P. montezumae* and *P. teocote*) is of 33, 27 and 25 years, respectively. In the case of the eucalyptuses and of the casuarinas, the records of the SARH (1990) indicate that the plantations are of 37 years.

In terms of the soil formation rate (soil properties, soil depth, and age of plantations), the eucalyptuses and the casuarinas are the most relevant in the zone (1.43 and 1.35 cm per year on the average, respectively), in contrast with the pines (*teocote* and *montezumae*), where their influence is less (0.6 and 0.9 cm per year, on the average). In soils formed by volcanic ash, 1.3 cm per year has been reported (Mohor and Van Baren, 1954), which means that the eucalyptuses accelerate the soil formation process, even in hardened materials such as the tepetates (Zebrowski, 1992).

CONCLUSIONS

In the eastern part of the State of Mexico and over the outcroppings of red tepetate, the plantations with cypressus and casuarinas are the forest species that result beneficial for the restoration of the environment in terms of soil formation in a period of 35 years. In the case of pines (*montezumae* and *teocote*), although they adapt well to these conditions, their influence on soil formation is considered scant. Finally, the eucalyptuses form soil, but they acidify it and accelerate the lixiviation of bases in red tepetates; furthermore, they reduce the rate of water infiltration in the soil. In Mexico vast areas are reforested with eucalyptus, therefore it is recommended that an evaluation be made of their impact on soil formation, given that they may not be useful from the viewpoint of environmental restoration.

(teocote y montezumae), donde su influencia es menor (0.6 y 0.9 cm por año en promedio). En suelos formados por cenizas volcánicas se ha reportado 1.3 cm por año (Mohor y Van Baren, 1954), lo que significa que los eucaliptos aceleran el proceso de formación de suelos, aun en materiales endurecidos como los tepetates (Zebrowski, 1992).

CONCLUSIONES

En el oriente del Estado de México y sobre los afloramientos de tepetate rojo, las plantaciones con cupressus y casuarinas son las especies forestales que resultan benéficas para la restauración del ambiente en términos de formación de suelos en un periodo de 35 años. En el caso de los pinos (montezumae y teocote), si bien se adaptan a estas condiciones, su influencia en la formación de suelos se considera escasa. Finalmente, los eucaliptos forman suelo pero lo acidifican y aceleran el lixiviado de bases en tepetates rojos; además, reducen la tasa de infiltración del agua en el suelo. En nuestro país se reforestan vastas áreas con eucaliptos, por lo que se recomienda evaluar su impacto en la formación de suelos, ya que pueden no ser útiles desde el punto de vista de restauración ambiental.

LITERATURA CITADA

- Adame, M. S. (1991). *Cartografía y evaluación de las plantaciones forestales en la parte oriente de la cuenca de México*. Chapingo, México. Colegio de Postgraduados.
- Alfaro, S. G., Oleschko K., & Meza, S. M. (1992). Rasgos micromorfológicos de los tepetates de Huexotla (Estado de México). *Terra* 10, 253-258.
- Arias, R. H., & García, T. G. (1992). Evaluación de la reforestación sobre tepetates en la zona oriente de la cuenca de México. *Terra* 10, 430-436.
- Baldock, J. A., & Nelson, P. N. (2000). Soil organic matter B25-B84. In: *Handbook of soil science*. Summer, M. E. (ed), Washington D.C. USA. CRC. Press,
- 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.
- Boul, S. W., Hole, F. D., & Mccracken, R. J. (1997). *Soils, Genesis and Classification*. 4th ed. Iowa. USA. Iowa State Univ. Press.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (1999). *The nature and properties of soils*. Twelfth edition. United States of America. Prentice Hall.
- Bullock, P., Federoff, N., Jongerius, A., Stoops, G., & Tursina, T. (1985). *Handbook for soil thin section description*. England. Wayne Research Publications.
- Chadwick. O. A., & Graham R. C. (2000). Pedogenic processes, E41-E45 p. In: *Handbook of Soil Science*. Summer, M. E. (ed.). Washington D.C. CRC Press.
- Coleman, D. C., & Crossley, D. A. (1996). *Fundamentals of soil ecology*. San Diego, CA. Academic Press.
- Cuanalo de la C., H. E. (1975). *Manual de descripción de perfiles en el campo*. Chapingo, México. Colegio de Postgraduados.
- Etchevers, B. J., López, R. R. M., Zebrowski, C., & Peña, H. D. (1992). Características químicas de tepetate de referencia de los estados de México y Tlaxcala, México. *Terra* 10, 171-177.
- Foss, J. E., Morman, F. R., & Reiger, S. (1983). Inceptisols, 355-381 p. In: L. P. Wilding, L. P., Smeck, N. E., Hall, G. F. (eds.). *Pedogenesis and soil taxonomy II. The soil orders*. Amsterdam, Holanda. Elsevier Science Publishers.
- Gama-Castro, J., Solleiro-Rebolledo E., Flores-Román D., Sedov S., Cabadas-Báez H., & 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. 1, 133-145.
- García, E. (1981). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Offset Larios Ed.
- García, H. M. A., García, H. M. A., Ivan Castellanos, V. I., Cano, S. Z., & Pelaez, R. C .M. (2008). Variación de la velocidad de infiltración media en seis ecosistemas inalterados. *Terra Latinoamericana* 26 (1), 21-27.
- Gourlay, I. D. (1995). Growth ring characteristics of some African Acacia species. *J. Trop. Ecol.* 11, 121-140.
- Grissino-Mayer, H. D. (2003). A manual and tutorial for the proper use of an increment borer. *Tree-Ring Research* 59(2), 63-79.
- Hendrix, P. F. (1995). *Earthworm ecology and biogeography in North America*. Boca Raton, Florida, USA. CRC Publishers.
- Kuo, M., & Mcginnes Jr., E. A. (1973). Variation of anatomical structure of false rings in eastern redcedar. *Wood Sci.* 5, 205-210.
- López, A. J .L., Valdez, H. J. I., Terrazas, T., & Valdez, L. J. R. (2006). Anillos de crecimiento y su periodicidad en tres especies tropicales del estado de Colima, México. *Agrociencia* 40, 533-544.
- Llerena, V. F., & Sánchez, B. B. (1992). Recuperación de tepetates en la vertiente oriental del Valle de México. *Terra* 10, 303-308.
- 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, 1-17.
- Martínez, R. R., Azpiros, H. S., Rodríguez De La O., R. J., Cetina, A. V. M., & Gutiérrez E. A. (2006). Importancia de las plantaciones forestales de *Eucalyptus*. *Ra Ximhai*. 2, 815-846.

- Midgley, S. J., Turnbull, J. W., & Hartney, V. J. (1986). Fuelwood species for salt affected sites. *Reclamation and Revegetation Research* 5, 285-303.
- Mohor, E. C. J., & van Baren F. A. (1954). *Tropical Soils: A critical study of soil genesis as related to climate, rock, and vegetation*. The Royal Tropical Inst. Amsterdam.
- Mooser, F. (1961). Informe sobre la geología de la cuenca del Valle de México. Comisión Hidrológica del Valle de México. México, D.F. Secretaría de Recursos Hidráulicos.
- Murphy, C. P. (1985). Thin section preparations for soil and sediments. Great Britain. AB Academic publishers.
- Navarro, G. H., Pérez O. A., & Flores S. D. (2004). Productividad del tepetate con sistemas rotacionales. *Terra Latinoamericana* 22 (2), 71-79.
- Pimentel, B. L. (1992). Cómo hacer productivos a los tepetates en México. *Terra* 10, 303-308.
- Porta, C. J., López, A. R. M., & Roquero, D. C. (1999). *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*. España. Ed. Mundi-Prensa.
- Reynolds, W. D., & 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.
- SARH. (1990). Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Comisión Nacional del Agua. Proyecto Lago de Texcoco. *Evaluación del Programa de Reforestación del Proyecto Lago de Texcoco*. AGRIFEFOR, Chapingo, S. C.
- Soil Survey Staff. (2010). Claves para la Taxonomía de Suelos. Traducido por: Ortiz S. C.A., Gutiérrez C. Ma del C., Gutiérrez, C.E.V. Washington. D.C. Natural Resources Conservation Service (NRCS).
- Stahle, D. W., Villanueva, J., Cleaveland, M. K., & Therrel, M. D. (2000). Recent tree-ring research in Mexico, 285-306 p. In: ROIG, F. A. (ed.) *Dendrocronología en América Latina*. Mendoza, Argentina. EDIUNC.
- Tomlin, A. D., Shipatalo, M. J., Edwards, W. M., & Protz, R. (1995). Earthworms and their influence on soil structure and infiltration, 159-184 p In: HENDRIX, P. F. (ed.) *Ecology and biogeography of earthworms in North America*. Boca Raton, Florida, USA. Lewis Publisher.
- Valdez M., L. A. (1970). Características morfológicas y mineralógicas de los suelos de tepetate de la cuenca de México. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, México.
- Van Reeuwijk, L. P. (2003). *Procedimientos para análisis de suelos*. Trad. al español por Gutiérrez, C. Ma. Del C., Tavares, E. C. A., Ortiz, S. C. A. Montecillo, Estado de México. Colegio de Postgraduados.
- 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, 225-234.
- Zebrowski, C. (1992). Los Suelos Volcánicos endurecidos de América Latina. *Terra* 10, 16-23.