

PROPIEDADES MECÁNICAS Y QUÍMICAS DE LAS RAÍCES DE ÁRBOLES NATIVOS Y SU POSIBLE EFECTO SOBRE LA ESTABILIDAD DEL SUELO EN DURANGO

MECHANICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF NATIVE TREE ROOTS AND THEIR POSSIBLE EFFECT ON SOIL STABILITY IN DURANGO

Bejar-Pulido, S.J.; F.J. Hernández; I. Cantú-Silva; H. González-Rodríguez; E.O. Luna-Robles y T.G. Domínguez-Gómez

PROPIEDADES MECÁNICAS Y QUÍMICAS DE LAS RAÍCES DE ÁRBOLES NATIVOS Y SU POSIBLE EFECTO SOBRE LA ESTABILIDAD DEL SUELO EN DURANGO

MECHANICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF NATIVE TREE ROOTS AND THEIR POSSIBLE EFFECT ON SOIL STABILITY IN DURANGO



Propiedades mecánicas y químicas de las raíces de árboles nativos y su posible efecto sobre la estabilidad del suelo en Durango

Mechanical and chemical properties of native tree roots and their possible effect on soil stability in Durango

Bejar-Pulido, S.J.;
F.J. Hernández;
I. Cantú-Silva;
H. González-Rodríguez;
E.O. Luna-Robles
y T.G. Domínguez-Gómez

PROPIEDADES
MECÁNICAS Y QUÍMICAS
DE LAS RAÍCES DE
ÁRBOLES NATIVOS Y SU
POSIBLE EFECTO SOBRE
LA ESTABILIDAD DEL
SUELO EN DURANGO

MECHANICAL AND
CHEMICAL PROPERTIES
OF NATIVE TREE ROOTS
AND THEIR POSSIBLE
EFFECT ON SOIL
STABILITY IN DURANGO

POLIBOTÁNICA

Instituto Politécnico Nacional

Núm. 57: 107-124. Enero 2024

DOI:

10.18387/polibotanica.57.6

Silvia Janeth Bejar-Pulido / siljan2411@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-5163-704X>

Francisco Javier Hernández

<https://orcid.org/0000-0003-0480-624X>

Instituto Tecnológico de El Salto, Mesa del Tecnológico SN, Forestal
C.P. 34942. El Salto, Durango, México

Israel Cantú-Silva

<https://orcid.org/0000-0001-8996-0881>

Humberto González-Rodríguez

<https://orcid.org/0000-0003-0798-0825>

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales, Carretera
Nacional núm. 85 Km 145. C.P. 67700. Linares, Nuevo León, México

Erik Orlando Luna-Robles

<https://orcid.org/0000-0001-5133-0403>

Tilo Gustavo Domínguez-Gómez

<https://orcid.org/0000-0002-6106-007X>

Instituto Tecnológico de El Salto, Mesa del Tecnológico SN, Forestal
C.P. 34942. El Salto, Durango, México

RESUMEN: En México los desastres naturales relacionados con sedimentos, como los desprendimientos, deslizamientos y aluviones, generalmente son inducidos por actividades antropogénicas como la construcción de caminos, que modifican, la cubierta vegetal, características del suelo, la densidad de las raíces y la estabilidad de los taludes. El objetivo de esta investigación fue evaluar las características mecánicas y químicas de raíces de especies forestales arbóreas (*J. deppeana*, *Q. sideroxylla*, *P. durangensis* y *P. cooperi*) presentes en cortes de talud de la carretera principal que conecta la zona urbana con la zona rural del municipio de Pueblo Nuevo, Durango. Se colectaron 30 muestras de raíces por especie y fueron divididas en tres categorías diamétricas (CD) (CD I = 0.1-3.0 mm, CD II = 3.1-6.0 mm y CD III = 6.1-10 mm). Las propiedades mecánicas (fuerza máxima de quiebre [F_{max}], fuerza de tensión [T_s] y módulo de elasticidad [E_{root}]) se analizaron con una maquina universal *Instron SATEC* a una velocidad constante de 10 mm/min. La cantidad de celulosa, lignina y hemicelulosa se determinó por medio del método de Van-Soest. Los resultados mostraron diferencias significativas entre especies para todas las propiedades analizadas. Particularmente *J. deppeana* presentó valores más altos de F_{max} , T_s y E_{root} de 402.80 N, 34.06 N mm², 1283.45N mm², así como de los contenidos de celulosa (40.29%), hemicelulosa (12.57%) y lignina (37.63%). La caracterización mecánica y química de las raíces de las especies forestales evaluadas provee información importante que puede ser considerada en actividades de mantenimiento y rehabilitación de taludes.

Palabras clave: suelo; fijación; fuerza de tensión; especies forestales; celulosa

ABSTRACT: In Mexico, natural disasters related to sediments, such as landslides, landslides and alluviums, are generally induced by anthropogenic activities such as

road construction, which modify the vegetation cover, soil characteristics, root density and soil stability. slopes. The objective of this research was to evaluate the mechanical and chemical characteristics of roots of tree forest species (*J. deppeana*, *Q. sideroxylla*, *P. durangensis* y *P. cooperi*) present in slope cuts of the main road that connects the urban area with the rural area of the municipality of Pueblo Nuevo, Durango. 30 root samples per species were collected and divided into three diameter categories (CD) (CD I = 0.1-3.0 mm, CD II = 3.1-6.0 mm and CD III = 6.1-10 mm). The mechanical properties (maximum breaking force [F_{max}], tensile strength [T_s] and elastic modulus [E_{root}]) were analyzed with an *Instron SATEC* universal machine at a constant speed of 10 mm/min. The amount of cellulose, lignin and hemicellulose was determined using the Van-Soest method. The results showed significant differences between species for all the properties analyzed. Particularly *J. deppeana* presented higher values of F_{max} , T_s and E_{root} of 402.80 N, 34.06 N mm², 1283.45 N mm², as well as the contents of cellulose (40.29%), hemicellulose (12.57%) and lignin (37.63%). The mechanical and chemical characterization of the roots of the evaluated forest species provides important information that can be considered in slope maintenance and rehabilitation activities.

Key words: soil; fixation; tensile strength; forest species; cellulose

INTRODUCCIÓN

En México los desastres naturales relacionados con sedimentos, como los desprendimientos, deslizamientos y aluviones, generalmente son inducidos por actividades antropogénicas como la construcción de caminos, que modifican, la cubierta vegetal, características del suelo, la densidad de las raíces y la estabilidad de los taludes (Vergani *et al.*, 2012; Stokes *et al.*, 2014; Abdi, 2018). Aunado a lo anterior, la presencia de fenómenos hidrometeorológicos y eventos geofísicos son considerados como los principales detonantes de la inestabilidad del suelo (Mora-Ortiz & Rojas-González, 2012).

Cabe señalar que gran parte de los diferentes asentamientos humanos y caminos urbanos y rurales de la Sierra Madre Occidental presentan sensibilidad de ser afectadas por la inestabilidad de taludes debido al típico relieve accidentado (González-Elizondo *et al.*, 2012). Además, la situación geográfica de México lo expone a fenómenos hidrometeorológicos del Pacífico, que lo hace más susceptible a los procesos de remoción de masas (De la Rosa & Valdés-Rodríguez, 2021).

Una alternativa para mantener la estabilidad de los taludes más económica, ecológica y sustentable es la implementación de la bioingeniería de suelos (Stokes *et al.*, 2014; Sánchez-Castillo *et al.*, 2017; Valdés-Rodríguez *et al.*, 2020). Es considerada una práctica efectiva, donde la vegetación desempeña un papel importante, brindando múltiples beneficios tales como la intercepción de la precipitación, aumento de la evapotranspiración, reducción de la humedad del suelo, disminución de la erosión, las raíces refuerzan al talud contra fallas, mejora de la infiltración y permeabilidad del suelo, entre otros (Gray & Sotir, 1996; Vergani *et al.*, 2012; Chao *et al.*, 2017; García & Vidal, 2021; Vallarino *et al.*, 2021). No obstante, la elección correcta de las especies a utilizar en pendientes no suele ser fácil, ya que se requiere de información sobre la ecología de las plantas y su eficiencia para fijar y reforzar el suelo, por lo que la determinación de las variables químicas y mecánicas de las raíces son una herramienta que puede ser consideradas en la bioingeniería de suelos (Vallarino *et al.*, 2021).

El sistema radicular desempeña diversas funciones mejora las propiedades físicas y químicas del suelo y modifica la estructura y la resistencia del suelo a la erosión (Guo *et al.*, 2016), además, es el componente con mayor interacción con el anclaje y fijación del suelo, la cual varía de acuerdo a las características morfológicas (tipo y forma de raíz), mecánicas (fuerza máxima de quiebre, fuerza de tensión y módulo de elasticidad), químicas (contenidos de celulosa, hemicelulosa y lignina), profundidad del suelo, densidad de raíces y nivel de penetración (Valdés, 2016) de las raíces que presentan las especies empleadas en la

revegetación del talud (Fernández-Villarreal *et al.*, 2022; Genet *et al.*, 2010; Ruan *et al.*, 2022; Yang *et al.*, 2016). Por lo anterior, se propone como objetivo la evaluación de las características mecánicas y químicas de raíces de especies forestales arbóreas presentes en cortes de talud de la carretera principal que conecta la zona urbana con la zona rural del municipio de Pueblo Nuevo, Durango, con el fin de proponer una posible estrategia sostenible sobre que especies podrían mejorar la estabilidad del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en El Salto, Durango, perteneciente a la cadena montañosa de la Sierra Madre Occidental, localizado entre las coordenadas 23° 43' 22" N y 105° 24' 36" W. Específicamente, en el tramo carretero El Salto-La Peña, con una altitud de 2500-2800 msnm. La precipitación media anual es de 1300 mm, y temperatura media anual de 3 a 18°C. Los principales tipos de clima son C (E) (M): semifrío húmedo, C (E) (W2): semifrío subhúmedo, C (W2): templado subhúmedo; con lluvias durante el verano (García, 2004). La vegetación se encuentra dominada por bosques de Pino-Encino.

Muestreo

El muestreo empleado fue dirigido hacia las raíces finas de especies arbóreas nativas de *Juniperus deppeana* Steud, *Quercus sideroxyla* Humb. & Bonpl, *Pinus durangensis* Martínez y *Pinus cooperi* C.E. Blanco, de mayor representatividad ecológica y económica que están presentes sobre los cortes de taludes del tramo carretero El Salto-La Peña.

Para realizar las pruebas mecánicas de las raíces, primeramente, se identificaron de los sistemas radiculares expuestos las raíces vivas que entraran en las siguientes categorías diamétricas (CD): I) de 0.1 a 3.0 mm, II) 3.1 a 6.0 mm y III) de 6.1 a 10 mm, una vez identificadas se colectaron 30 muestras (10 por CD) de 10 cm de longitud de cada especie seleccionada, sin daños físicos aparentes (Sánchez-Castillo *et al.*, 2017).

Para el análisis químico del contenido de fibras se aumentó el número de muestras (60) hasta alcanzar el peso seco mínimo requerido (2 g) por CD. Las muestras de las raíces colectadas fueron llevadas al laboratorio de Tecnología de la Madera del Instituto Tecnológico de El Salto para su preparación y análisis mecánico. Para la determinación de los componentes químicos las raíces fueron secadas en una estufa de secado marca Felisa®, Model FE-292AD a una temperatura de 60°C durante 24 horas y posteriormente trasladadas al laboratorio de Nutrición de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

La fuerza máxima de quiebre de las raíces de cada especie se determinó en la máquina *Universal Instron SATEC* con capacidad máxima de carga de 60 toneladas, aplicando una velocidad constante de 10 mm/min¹. Los datos se visualizaron en el programa Merlin. Primeramente, los extremos de las raíces sin corteza se reforzaron con cilindros de resina epóxica similar a lo realizado por Ammann *et al.* (2009) lo cual permite una transferencia limpia de fuerza desde los dispositivos de sujeción a la raíz sin resbalones o daños (Figura 1).

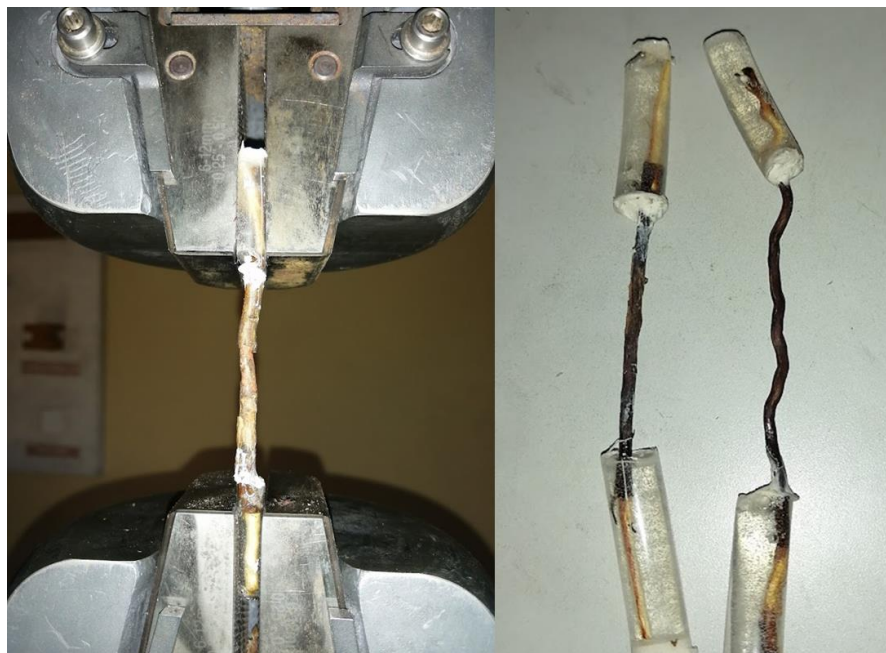


Figura 1. Muestras de raíz preparadas con extremos radiculares moldeados en resina sintética.
Figure 1. Root samples prepared with root tips embedded in synthetic resin.

Conociendo la fuerza máxima de quiebre (F_{max}) de las raíces de cada una de las CD de cada especie, se estimó la fuerza de tensión (T_s) expresada en $N\ mm^2$ y el módulo de elasticidad $N\ mm^2$ (E_{root}) que indica la rigidez de la raíz, aplicando las siguientes ecuaciones:

$$T_s = F_{max}/\pi(D/2)^2$$

$$E_{root} = \frac{F_{max}/A_0}{\Delta L/L_0}$$

dónde:

- F_{max} = fuerza máxima de quiebre (N)
- D = diámetro promedio de la raíz (mm)
- A_0 = área de la sección transversal (mm^2)
- ΔL = cambio en la longitud de la raíz (mm)
- L_0 = longitud inicial de la raíz (mm)

La determinación de los contenidos de fibras se desarrolló por medio del método de Van-Soest *et al.* (1991), por el fraccionamiento secuencial de la pared celular, obteniendo la cantidad de celulosa, hemicelulosa y lignina (Fernández-Villarreal *et al.*, 2022).

Análisis estadístico

Los datos de las propiedades mecánicas (F_{max} , T_s y E_{root}) y químicas (celulosa, hemicelulosa y lignina) cumplieron con los supuestos de normalidad (Kolmogorov-Smirnov) y homogeneidad de varianzas (Levene), por lo que se realizó un análisis de varianza con arreglo bifactorial, para determinar si existen diferencias significativas entre los factores y su interacción con un nivel de significancia de 0.05. Para diferenciar los valores medios se utilizó la prueba Tukey ($p \leq 0.05$). Asimismo, se aplicó un análisis de regresión para determinar si el diámetro de las raíces de las cuatro especies está correlacionado con la fuerza de tensión y el módulo de elasticidad. Los análisis estadísticos se realizaron con el paquete estadístico SPSS Statistics Versión 22 (International Business Machines (IBM), 2013).

RESULTADOS

Propiedades mecánicas de las raíces

En la Tabla 1 se observan los estadísticos descriptivos del A_0 y F_{max} en las unidades muestreadas, en donde el valor medio más alto del A_0 los presentó *P. durangensis* y el menor *J. deppeana*, mientras que el valor medio más alto y bajo de la F_{max} se presentó en *J. deppeana* y *P. cooperi*, respectivamente.

Tabla 1. Valores mínimos (min), máximos (max) media, desviación estándar (DS) y varianza del área de la sección transversal (A_0) y fuerza máxima de quiebre (F_{max}) de las raíces en las unidades muestreadas.

Table 1. Minimum (min), maximum (max), mean, standard deviation (SD), and variance values of the cross-sectional area (A_0) and maximum breaking force (F_{max}) of the roots in the sampled units.

Especie	Variable	Min	Max	Media	DS	Varianza
<i>J. deppeana</i>	A_0 (mm ²)	1.35	60.68	18.58	18.03	325.26
	F_{max} (Kgf)	6.74	88.16	41.07	25.42	646.50
<i>Q. sideroxylla</i>	A_0 (mm ²)	1.43	60.68	18.69	16.11	259.74
	F_{max} (Kgf)	9.28	78.85	33.37	27.59	761.41
<i>P. durangensis</i>	A_0 (mm ²)	2.01	68.08	24.53	19.03	362.26
	F_{max} (Kgf)	15.33	63.64	37.35	16.70	279.06
<i>P. cooperi</i>	A_0 (mm ²)	3.27	49.64	19.52	14.60	213.40
	F_{max} (Kgf)	9.56	40.52	23.26	11.68	136.55

De acuerdo con el análisis de varianza, las propiedades mecánicas, F_{max} , T_s y E_{root} de las raíces, mostraron diferencias altamente significativas entre especies y diámetros de las raíces, así como en su interacción ($p < 0.01$) (Tabla 2).

Tabla 2. Análisis de varianza entre especies, categorías diamétricas y su interacción para F_{max} , T_s y E_{root} de las raíces de cuatro especies forestales.

Table 2. Analysis of variance between species, diameter categories, and their interaction for F_{max} , T_s , and E_{root} of the roots of four forest species.

Fuentes de variación	Variables	gl	CM	F	Prob. de F
Especie	F_{max}	3	169847.0	126.7	<0.01
	T_s	3	1804.0	24.1	<0.01
	E_{root}	3	5549840.8	57.5	<0.01
Diámetro de las raíces	F_{max}	2	2163322.7	1613.4	<0.01
	T_s	2	5895.1	78.6	<0.01
	E_{root}	2	1930324.7	20.0	<0.01
Especie*Diámetro de las raíces	F_{max}	6	102439.7	76.4	<0.01
	T_s	6	396.5	5.3	<0.01
	E_{root}	6	1578086.3	16.4	<0.01

La prueba de comparaciones múltiples de Tukey entre especies señala que *J. deppeana* y *P. durangensis* presentaron promedios significativamente similares ($p>0.05$) entre sí, siendo las más resistentes al quiebre; en contraste, *Q. sideroxylla* y *P. cooperi*, resultaron significativamente diferentes ($p\leq 0.05$) y menores en F_{\max} a las demás especies ($p\leq 0.05$). En relación con la T_s y al E_{root} , *J. deppeana* presentó los valores más altos y fue significativamente diferente a las demás especies ($p\leq 0.05$), en contraste con *P. cooperi*, especie reportada con los valores más bajos. A su vez, la T_s y el E_{root} fueron significativamente similares entre *P. durangensis* y *Q. sideroxylla*, respectivamente (Tabla 3).

Tabla 3. Valores medios \pm desviación estándar para F_{\max} , T_s y E_{root} ($n=120$) de las raíces de las especies evaluadas.
Table 3. Mean values \pm standard deviation for F_{\max} , T_s , and E_{root} ($n=120$) of the roots of the evaluated species.

Espece	F_{\max} (N)	T_s (N mm ²)	E_{root} (N mm ²)
<i>J. deppeana</i>	402.80 \pm 249.35 a	34.06 \pm 18.22 a	1283.45 \pm 708.12 c
<i>Q. sideroxylla</i>	327.34 \pm 270.61 b	22.20 \pm 12.75 b	619.36 \pm 484.41 b
<i>P. durangensis</i>	366.30 \pm 163.82 a	23.82 \pm 15.42 b	506.82 \pm 270.59 ab
<i>P. cooperi</i>	228.19 \pm 114.60 c	15.28 \pm 5.92 c	283.33 \pm 98.41 a

Letras distintas indican diferencias significativas ($p\leq 0.05$).

Por otra parte, la diferenciación de medias para las propiedades mecánicas por CD muestra que F_{\max} y la T_s fueron significativamente diferentes en cada una de las especies estudiadas, mientras que el E_{root} solamente se presentaron diferencias significativas entre las CD de *P. durangensis* y *P. cooperi*. Particularmente la CD I de *J. deppeana* y la CD III de *Q. sideroxylla* del E_{root} fueron superiores a las CD complementarias. A su vez, se observa que la F_{\max} incrementa con el diámetro, la T_s disminuye y el E_{root} no presenta una tendencia definida en cada una de las especies (Figura 2).

La comparación de medias de la interacción de factores se presenta en la Tabla 4, donde las CD III de las especies *J. deppeana* y *Q. sideroxylla* presentaron las más alta F_{\max} y además fueron significativamente similares. La F_{\max} de *P. cooperi* con CD II, *Q. sideroxylla* con CD II, *P. durangensis* con CD I y *J. deppeana* con CD I no presentaron diferencias significativas entre ellas. La menor F_{\max} de quiebre se registró entre las interacciones de las especies *Q. sideroxylla* con CD I y *P. cooperi* con CD I (Tabla 4).

En relación con la T_s , los resultados indican la formación de cuatro grupos de interacciones significativamente diferentes. El primer grupo, representando las interacciones con menor fuerza de tensión lo componen la CD III de las especies *J. deppeana*, *Q. sideroxylla*, *P. durangensis* y *P. cooperi*; CD II de *Q. sideroxylla*, *P. durangensis* y *P. cooperi* y la CD I de *P. cooperi*. El segundo grupo lo forman las interacciones de la CD II de *J. deppeana* y CD I de *P. cooperi*. El tercer grupo está conformado por la CD II de *J. deppeana* y CD I de *Q. sideroxylla* y *P. durangensis*. A su vez, la T_s más alta se dio en la CD I de *J. deppeana*, interacción que forma el cuarto grupo (Tabla 4).

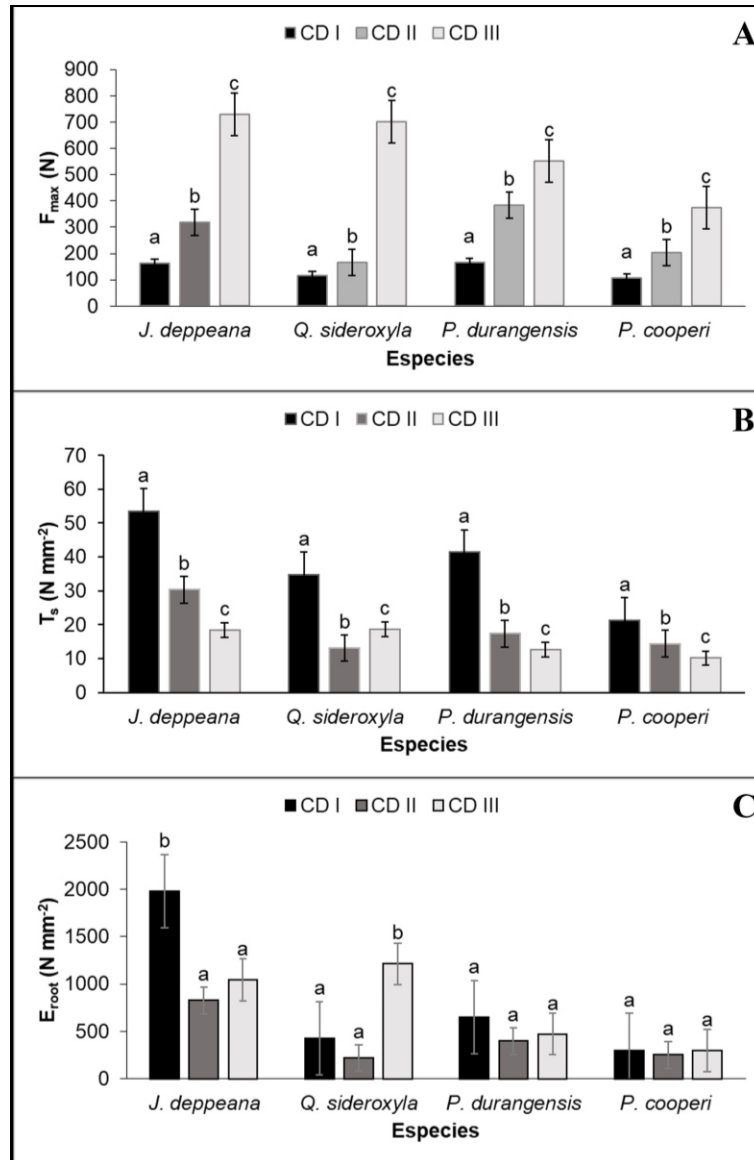


Figura 2. Propiedades mecánicas de las raíces de cuatro especies forestales; A) F_{max} , B) T_s y C) E_{root} por categoría diamétrica. Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$).

Figure 2. Mechanical properties of the roots of four forest species; A) F_{max} , B) T_s , and C) E_{root} by diameter category. Different letters indicate significant differences ($p \leq 0.05$).

Los resultados de la interacción del E_{root} indican que la CD I de *J. deppeana* registro el valor más alto. El grupo formado por la CD II y III de *J. deppeana* y CD III de *Q. sideroxylla*, fueron significativamente similares entre ellas, precediendo a la anterior de mayor E_{root} . A su vez, el grupo de la CD II y III de *J. deppeana* y CD I de *P. durangensis* presentaron el tercer mayor E_{root} . El menor E_{root} se registró en las tres CD de *P. cooperi*, CD II de *Q. sideroxylla* y la CD II de *P. durangensis* (Tabla 4).

Tabla 4. Comparación de medias de la interacción de factores (especies*CD) de la F_{max} , T_s y E_{root} .
Table 4. Comparison of means for the interaction of factors (species*CD) for F_{max} , T_s , and E_{root} .

Especie/CD	Propiedades mecánicas		
	F_{max} (N)	T_s (N mm ²)	E_{root} (N mm ²)
Jd/CD I	161.60 b	53.39 d	1979.44 e
Jd/CD II	317.14 c	30.33 bc	825.61 bcd
Jd/CD III	729.66 f	18.46 a	1045.31 cd
Qs/CD I	115.36 a	34.70 c	425.29 ab
Qs/CD II	166.35 b	13.15 a	221.45 a
Qs/CD III	700.31 f	18.74 a	1211.34 d
Pd/CD I	165.14 b	41.37 c	651.91 abc
Pd/CD II	382.98 d	17.39 a	397.40 a
Pd/CD III	550.79 e	12.70 a	471.15 ab
Pc/CD I	105.96 a	21.28 ab	301.21 a
Pc/CD II	203.76 b	14.42 a	252.31 a
Pc/CD III	374.85 d	10.14 a	296.49 a

La relación entre diámetro y T_s de las especies se presenta en las Figuras 3 y 4, donde la tendencia de los datos muestra que la T_s disminuye conforme incrementa el diámetro de las raíces en todas las especies, mientras que considerando el E_{root} , dicha tendencia, solo ocurre en las especies de *P. durangensis* y *J. deppeana*. La máxima relación entre la inversa de los diámetros de las raíces de las especies y la T_s se observó en *P. durangensis* ($R^2=0.935$), seguida de *P. cooperi* ($R^2=0.876$), *J. deppeana* ($R^2=0.743$) y *Q. sideroxylla* ($R^2=0.709$). En general, la relación entre E_{root} y diámetro en las cuatro especies presentó coeficientes de determinación (R^2) bajos.

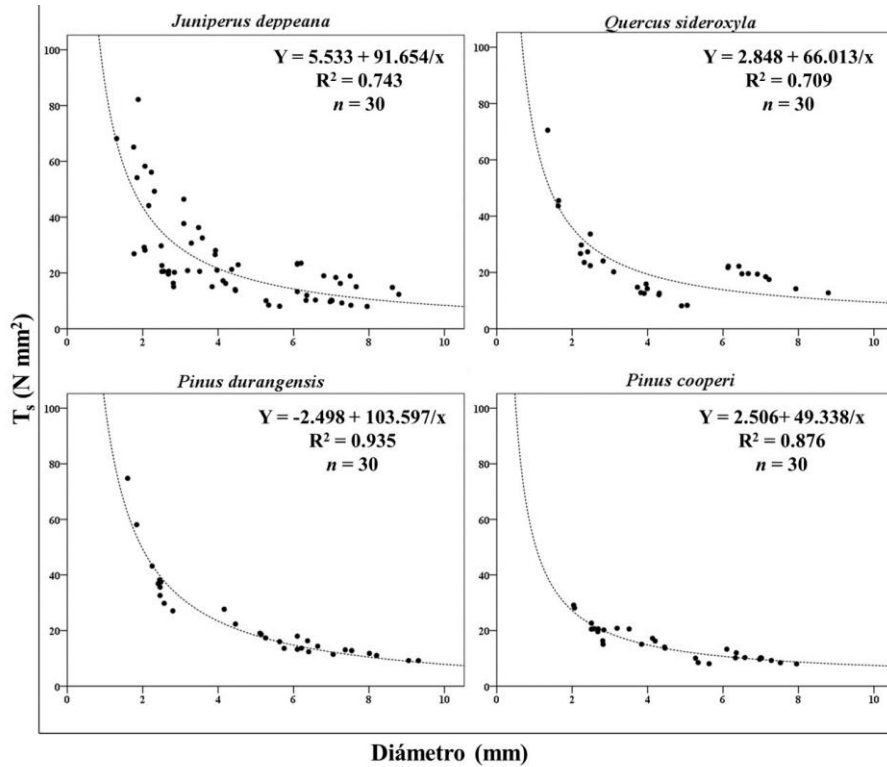


Figura 3. Relación entre diámetro y fuerza de tensión (T_s) de las especies analizadas.
Figure 3. Relationship between diameter and tensile strength (T_s) of the analyzed species.

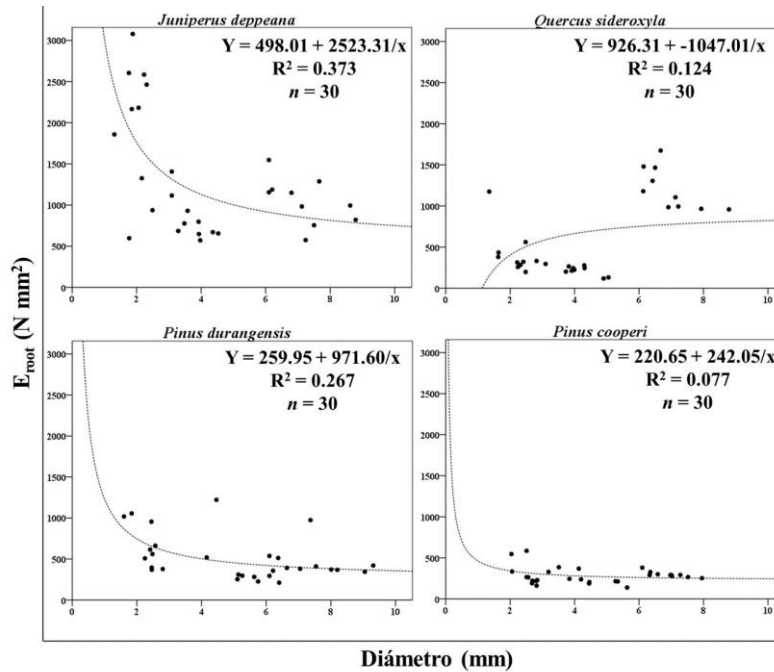


Figura 4. Relación entre diámetro y módulo de elasticidad (E_{root}) de las especies analizadas.
Figure 4. Relationship between diameter and modulus of elasticity (E_{root}) of the analyzed species.

Análisis del contenido de fibras

El análisis de varianza indica diferencias altamente significativas para los contenidos de celulosa, hemicelulosa y lignina, entre especies como por CD. En la interacción solo hemicelulosa no presentó diferencias significativas (Tabla 5).

Tabla 5. Análisis de varianza entre especies, categorías diamétricas y su interacción para las variables químicas.
Table 5. Analysis of variance between species, diameter categories, and their interaction for the chemical variables.

Fuentes de variación		gl	CM	F	Sig.
Especie	Celulosa	3	0.021	381.11	<0.01
	Hemicelulosa	3	0.067	40.29	<0.01
	Lignina	3	0.227	1137.89	<0.01
Diámetro de las raíces	Celulosa	2	0.028	519.78	<0.01
	Hemicelulosa	2	0.139	83.82	<0.01
	Lignina	2	0.090	449.84	<0.01
Especie * Diámetro de las raíces	Celulosa	6	0.000	4.02	0.004
	Hemicelulosa	6	0.001	0.72	0.636
	Lignina	6	0.001	6.15	<0.01

En la Figura 5 se muestran los resultados de las comparaciones múltiples de los valores medios de los contenidos de fibras para las cuatro especies evaluadas. En relación con el contenido de celulosa, *J. deppeana* y *P. cooperi* fueron las especies que presentaron el mayor y menor contenido de celulosa respectivamente. A su vez, la mayor concentración de hemicelulosa se mostró en *Q. sideroxylla*, *P. durangensis* y *P. cooperi* que fueron significativamente similares entre sí, mientras que *J. deppeana* registró el menor contenido de hemicelulosa. Por último, el mayor contenido de lignina se registró en *J. deppeana* y *Q. sideroxylla*, mientras que el más bajo se reportó en las especies de *P. durangensis* y *P. cooperi*.

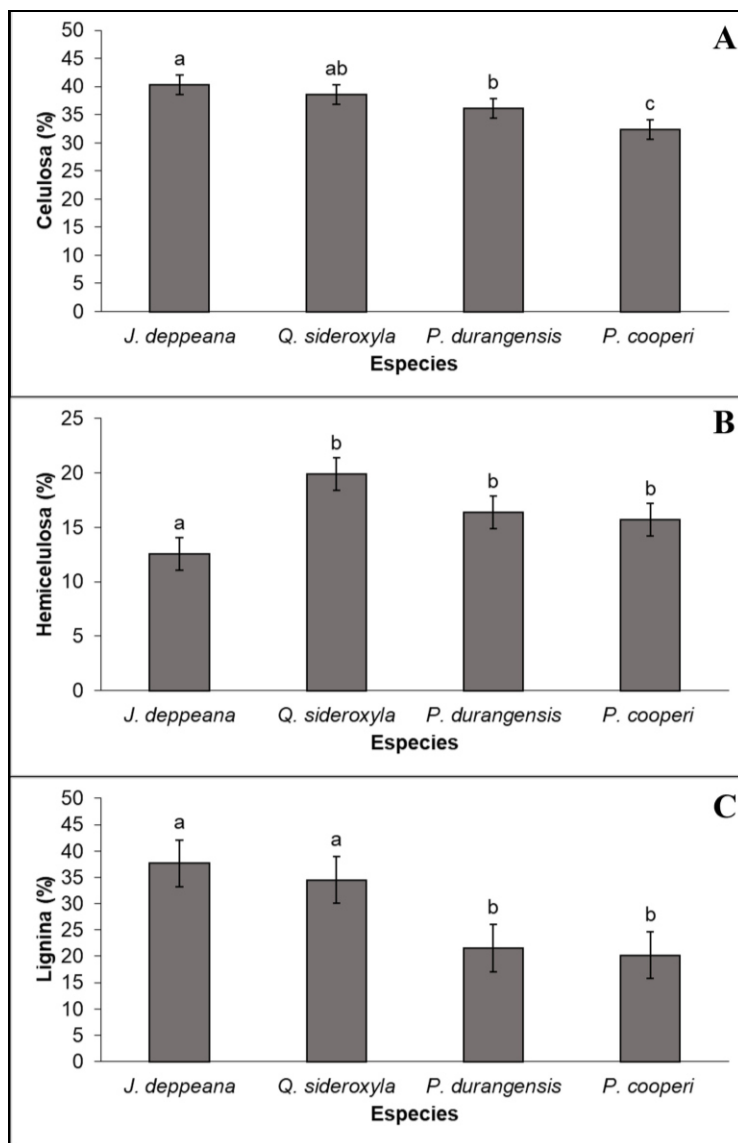


Figura 5. Propiedades químicas de cuatro especies forestales; A) celulosa, B) hemicelulosa y C) lignina de las raíces por especie evaluada ($n=48$). Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$).

Figure 5. Chemical properties of four forest species; A) cellulose, B) hemicellulose, and C) lignin of the roots for the evaluated species ($n=48$). Different letters indicate significant differences ($p \leq 0.05$).

De acuerdo con la Figura 6, los contenidos de celulosa y hemicelulosa de las raíces de las cuatro especies presentaron una misma tendencia entre las CD, donde al incrementarse el diámetro de la raíz disminuyó significativamente el contenido de estos dos componentes químicos. Por otra parte, la lignina presentó un comportamiento contrario, es decir a mayor diámetro mayor contenido de esta fibra para todas las raíces de especies evaluadas.

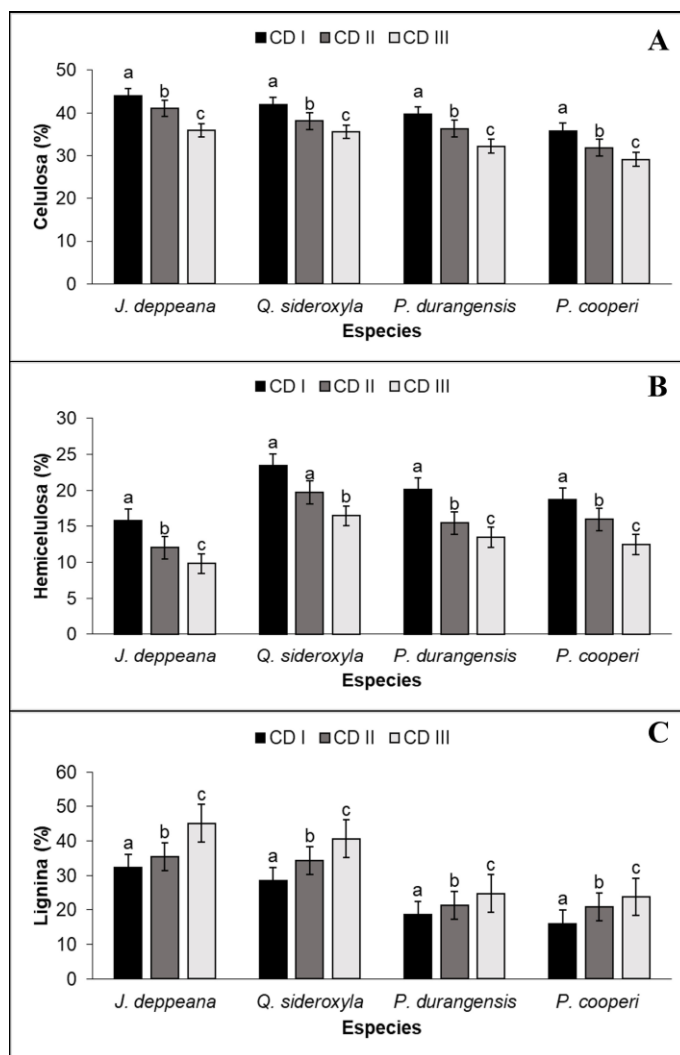


Figura 6. Comparación de medias de los contenidos de A) celulosa, B) hemicelulosa y C) lignina entre categorías diamétricas por especie ($n=12$). Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$).

Figure 6. Comparison of means of the contents of A) cellulose, B) hemicellulose, and C) lignin between diameter categories by species ($n=12$). Different letters indicate significant differences ($p \leq 0.05$).

DISCUSIÓN

Según Sánchez-Castillo *et al.* (2017) y Zavala-González *et al.* (2019) existe una estrecha relación entre los aumentos de diámetro de las raíces y la F_{\max} ; los resultados del presente estudio coinciden con lo antepuesto, lo cual puede estar atribuido a la naturaleza química de las raíces. De acuerdo con Fernández-Villarreal *et al.* (2022) el contenido de celulosa aumenta la resistencia al quiebre, lo cual puede verse reflejado en las raíces de *J. deppeana* que presentaron los mayores contenidos de celulosa y F_{\max} .

El contenido de celulosa y la fuerza de tensión fueron más altos en la CD I (0.1-3.0 mm) en todas las especies, y disminuyó conforme incrementó el diámetro de la raíz siguiendo la función de ley de potencia negativa (Genet *et al.*, 2005, 2010; Hales *et al.*, 2009; Jung-Tai *et al.*, 2017). En este sentido, Zhang *et al.* (2014) y Melese *et al.* (2021), especifican que las raíces de

diámetros pequeños presentan una mayor fuerza de tensión, debido al alto contenido de celulosa, generando mayor resistencia a la falla y mejorando el refuerzo de la raíz.

Gray & Sotir (1996) y Martínez *et al.* (2022) señalan que el tipo de madera ya sea dura o blanda puede influir significativamente sobre la fuerza de tensión o resistencia a la tracción, específicamente las especies de maderas duras tienden a encontrarse en un rango de 8 a 80 N mm² en diámetros de 2 a 15 mm, mientras que las maderas blandas específicamente las de pino varían de 1.54 a 21.50 N mm² en diámetros de 0.1-10 mm (Sánchez-Castillo *et al.*, 2017). En este estudio los datos de tensión presentaron el siguiente orden ascendente 15.28<22.20<23.82<34.06 N mm² con diámetros de 0.1 a 10 mm, y donde el valor más bajo corresponde a una especie de madera menos densa o blanda (*P. cooperi*) y la más alta a madera más densa o dura (*J. deppeana*).

Las raíces de *J. deppeana* presentaron el mayor módulo de elasticidad, lo cual puede estar relacionado con los contenidos de celulosa y hemicelulosa, componentes químicos que le dan los atributos de elasticidad a la raíz, resistencia a la deformación, fallas en la tensión y efecto de refuerzo (Zhang *et al.*, 2014). En contraste con *P. cooperi* que presentó el menor módulo de elasticidad. Sánchez-Castillo *et al.* (2017) mencionan que las cortezas de las raíces de pino son gruesas, quebradizas y agrietadas, características típicas que pueden ocultar los defectos en la raíz, lo que podría provocar un efecto de variación en la medición del módulo de elasticidad, lo cual puede verse reflejado en los bajos coeficientes de determinación de las relaciones diámetro y E_{root} realizadas en el presente estudio.

De acuerdo con Maceda *et al.* (2022), la lignina es una sustancia hidrofóbica que elimina agua de las paredes celulares, pudiendo influir sobre la rigidez de la raíz que la hace menos elástica y más quebradiza. Lo que concuerda con los resultados del presente estudio donde se aprecia un incremento en el contenido de lignina conforme aumenta el diámetro y una menor fuerza de tensión, siguiendo la misma tendencia en todas las especies evaluadas.

Vergani *et al.* (2012) evaluaron en especies arbóreas del bosque alpino en Italia, donde la fuerza de quiebre osciló de 13.93 a 185.25 N, atribuyendo esta variabilidad a las características del sitio. La fuerza máxima de quiebre de las raíces presentó variabilidad entre las especies. Sin embargo, los valores para las especies del género *Quercus* y *Pinus* fueron ligeramente superiores a los reportados por Zavala-González *et al.* (2019) y Sánchez-Castillo *et al.* (2017) en la Sierra Madre Oriental. La variación de dichos valores puede estar influenciada por las características de los sitios tales como: altitud, suelo, profundidad del suelo, pendiente, área drenada y en menor proporción por otras variables ambientales de la zona que no fueron evaluadas en el presente estudio (Vergani *et al.*, 2012).

Se realizó una recopilación de diversos estudios de raíces de especies forestales donde se evaluó la F_{max} y T_s en diferentes regiones del mundo. Particularmente, los registros de F_{max} de *J. deppeana* y *P. durangensis*, especies del presente estudio sobresalen como las de mayor magnitud, al contrario *Q. sideroxyla* y *P. cooperi* mostraron valores relacionados con los determinados en especies del mismo género de la Sierra Madre Oriental. No obstante, los valores de la T_s presentaron una tendencia similar a la mayoría de las especies evaluadas (Tabla 6).

Tabla 6. Comparación de la fuerza máxima de quiebre (F_{max}) y de tensión (T_s) de diferentes estudios enfocados en especies forestales arbóreas.

Table 6. Comparison of maximum breaking force (F_{max}) and tensile strength (T_s) from different studies focused on tree forest species.

Autor	Especie	Lugar de evaluación	Diámetro (mm)	F_{max} (N)	T_s (N mm ²)
Vergani <i>et al.</i> (2012)	<i>Picea abies</i> L.	Bosque alpino, Italia	1-10	76.54	8.94
	<i>Larix decidua</i> Mill.			22.94	8.30
	<i>Fagus sylvatica</i> L.			116.47	16.51
	<i>Castanea sativa</i> Mill.			41.81	7.98
	<i>Acer pseudoplatanus</i> L.			67.83	12.65
	<i>Fraxinus excelsior</i> L.			45.70	9.41
	<i>Ostrya carpinifolia</i> Scop.			94.88	12.21
Yang <i>et al.</i> (2016)	<i>Betula platyphylla</i> Sukaczew	Bosque latifoliado	1-10	-	21.32
	<i>Quercus mongolica</i> Fisch. ex Ledeb.	caducifolio,		-	21.51
	<i>Pinus tabulaeformis</i> Carr.	China		-	11.38
	<i>Larix gmelinii</i> (Rupr.) Rupr.			-	12.71
Sánchez-Castillo <i>et al.</i> (2017)	<i>Quercus rysophylla</i> Weath.	Bosque de pino-encino, Sierra Madre Oriental, México	0-10	178.70	8.31
	<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl.			205.48	7.52
Abdi (2018)	<i>Acer velutinum</i> Boiss.	Bosque templado (hircaniano), Irán	0.29-5-29	64.15	30.77
	<i>Alnus glutinosa</i> (L.) Gaertn.			60.25	26.12
	<i>Carpinus betulus</i> L.			95.36	43.31
	<i>Fagus orientalis</i> Lipsky			74.92	30.47
	<i>Fraxinus excelsior</i> L.			54.29	12.74
	<i>Parrotia persica</i> (DC.) C.A.Mey.			84.59	36.41
	<i>Picea abies</i> (L.) H.Karst.			66.51	15.75
	<i>Quercus castaneifolia</i> C.A.Mey.			83.59	42.67
Zavala-González <i>et al.</i> (2019)	<i>Arbutus xalapensis</i> Kunth.	Bosque de pino-encino, Sierra Madre Oriental, México	0-10	138.95	9.07
	<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl.			139.27	9.24
	<i>Quercus canbyi</i> Trel.			234.17	14.07
	<i>Quercus polymorpha</i> Schltld. & Cham.			218.08	11.34
	<i>Quercus rysophylla</i> Weath.			301.25	19.27
Melese <i>et al.</i> (2021)	<i>Salix subserrata</i> Thunb.	Especies exóticas, Etiopía	0.25-8.5	-	41.00
	<i>Eucalyptus globulus</i> Labill.			-	32.00
	<i>Psidium guajava</i> L.			-	38.00
Resultados del presente estudio (2023)	<i>Juniperus depepeana</i> Steud.	Bosque templado frío, Sierra Madre Occidental, México	0.1-10	402.80	34.06
	<i>Quercus sideroxyla</i> Humb. & Bonpl.			327.34	22.20
	<i>Pinus durangensis</i> Martínez			366.30	23.82
	<i>Pinus cooperi</i> C.E. Blanco			228.19	15.28

- Sin datos.

CONCLUSIONES

La caracterización mecánica y química de las raíces de las especies forestales evaluadas provee información importante que puede ser considerada en actividades de mantenimiento, rehabilitación y estabilización de taludes.

La F_{max} de las raíces de las cuatro especies incrementó conforme aumentó su diámetro. En contraste con la T_s que incrementó conforme disminuyeron los diámetros de las raíces, lo

anterior podría ser un indicador de un mayor refuerzo al suelo atribuido a la densidad de las raíces delgadas. Por otra parte, el E_{root} no mostró una relación directa con las categorías diamétricas empleadas.

J. deppeana fue la especie que presentó los valores más altos de F_{max} , T_s y E_{root} . Sin embargo, los valores medios en todas las especies fueron superiores a los citados en la literatura, por lo que las cuatro especies podrían ser empleadas en la revegetación de taludes de la zona evaluada para la precaución de fallos en los taludes.

En general, los contenidos de celulosa y hemicelulosa disminuyeron conforme incrementaron las categorías diamétricas para las cuatro especies, en contraste con los contenidos de lignina los cuales presentaron aumentos significativos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONAHCYT por la beca de posdoctorado otorgada para el desarrollo de la investigación.

LITERATURA CITADA

- Abdi, E. (2018). Root Tensile Force and Resistance of Several Tree and Shrub Species of Hyrcanian Forest, Iran. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 39, 225–270. <https://hrcak.srce.hr/204194>
- Ammann, M., Böll, A., Rickli, C., Speck, T., & Holdenrieder, O. (2009). Significance of tree root decomposition for shallow landslides. *Forest Snow and Landscape Research*, 82, 79–94. https://www.researchgate.net/profile/Ottmar-Holdenrieder/publication/228708326_Significance_of_tree_root_decomposition_for_shallow_landslides/links/09e4150878c57f1efd000000/Significance-of-tree-root-decomposition-for-shallow-landslides.pdf?_sg%5B0%5D=started_experiment_milestone&origin=journalDetail&rtd=e30%3D
- Chao, Y., Zhonglu, G., Chongfa, C., Fengling, Y., & Zhonghao, M. (2017). Physical and chemical properties of the root systems of 5 herbaceous plants and their correlations. *Grassland Science*, 34, 598–606. <https://www.fx361.com/page/2017/0327/19457793.shtml>
- De la Rosa, P., & Valdés-Rodríguez, O. A. (2021). *Usos de suelo y su relación con procesos de remoción en masa en la cuenca del río Nautla, Veracruz, México* (SEDEMA, Ed.; 1 ed.). https://www.researchgate.net/publication/350357798_Usos_de_suelo_y_su_relacion_con_procesos_de_remocion_en_masa_en_la_cuenca_del_rio_Nautla_Veracruz_Mexico
- Fernández-Villarreal, B., Zavala-González, R., Cantú-Silva, I., & González-Rodríguez, H. (2022). Composición química y morfología de raíces de cinco especies arbustivas nativas y su influencia en la fijación del suelo. *Botanical Sciences*, 100(1), 28–41. <https://doi.org/10.17129/botsci.2777>
- García, E. (2004). *Modificaciones to the Köppen climate classification system* (Serie Libros, Ed.; 6ed.). <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/view/83/82/251-1>
- García, M. M. J., & Vidal, C. V. C. (2021). *Estabilización de taludes en carreteras mediante la aplicación de la bioingeniería empleando plantones de pinos, tramo Piscobamba, Departamento de Ancash*. [Tesis]. Universidad César Vallejo.
- Genet, M., Li, M., Luo, T., Fourcaud, T., Clément-Vidal, A., & Stokes, A. (2010). Linking carbon supply to root cell-wall chemistry and mechanics at high altitudes in *Abies georgei*. *Annals of Botany*, 107(2), 311–320. <https://doi.org/10.1093/aob/mcq237>

- Genet, M., Stokes, A., Salin, F., Mickovski, S. B., Fourcaud, T., Dumail, J.-F., & van Beek, R. (2005). The Influence of Cellulose Content on Tensile Strength in Tree Roots. *Plant and Soil*, 278(1–2), 1–9. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-8768-6>
- González-Elizondo, M. S., González-Elizondo, M., Tena-Flores, J. A., Ruacho-González, L., & López-Enríquez, L. (2012). Vegetación de la sierra madre occidental, México: Una síntesis. *Acta Botánica Mexicana*, 100, 351–403. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-71512012000300012&script=sci_abstract&tlng=pt
- Gray, D. H., & Sotir, R. B. (1996). *Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization: A practical Guide for Erosion Control*. (John Wiley & Sons, Ed.). <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=kCbP6IvFHRAC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Biotechnical+and+Soil+Bioengineering+Slope+Stabilization:+A+practical+Guide+for+Erosion+Control.+&ots=JU7fHTTkao&sig=8ECc0FFdDP8GTuz9rqdwSByU1jc>
- Guo, X. M., Huang, R. H., He, B. H., Shen, P. C., & Li, T. Y. (2016). Correlation analysis of soil physico chemical properties under different soil and water conservation biological measures in Three Gorges Reservoir Region. *Pratacultural Science*, 33, 555–563. <https://www.fx361.com/page/2017/0327/19457793.shtml>
- Hales, T. C., Ford, C. R., Hwang, T., Vose, J. M., & Band, L. E. (2009). Topographic and ecologic controls on root reinforcement. *Journal of Geophysical Research*, 114(F3), F03013. <https://doi.org/10.1029/2008JF001168>
- International Business Machines (IBM). (2013). *IBM SPSS Statistics for Windows, version 22.0*. (22.0). USA: IBM Corp.
- Jung-Tai, L., Sung-Ming, T., & Ming-Jen, L. (2017). Uprooting resistance of two tropical tree species for sand dune stabilization. *African Journal of Agricultural Research*, 12(45), 3214–3220. <https://doi.org/10.5897/AJAR2017.12715>
- Maceda, A., Soto-Hernández, M., Peña-Valdivia, C. B., Trejo, C., & Terrazas, T. (2022). Lignina: composición, síntesis y evolución. *Madera y Bosques*, 27(2), 1–16. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2722137>
- Martinez, A., Dejong, J., Akin, I., Aleali, A., Arson, C., Atkinson, J., Bandini, P., Baser, T., Borela, R., Boulanger, R., Burrall, M., Chen, Y., Collins, C., Cortes, D., Dai, S., DeJong, T., Del Dottore, E., Dorgan, K., Fragaszy, R., ... Zheng, J. (2022). Bio-inspired geotechnical engineering: principles, current work, opportunities and challenges. *Géotechnique*, 72(8), 687–705. <https://doi.org/10.1680/jgeot.20.P.170>
- Melese D. T., Senadheera S., & Legas A. T. (2021). Effect of Diameter, Root Moisture Content, Gauge Length and Loading Rate on Tensile Strength of Plant Roots and Their Contribution to Slope Stability. *Lowland Technology International Journal*, 22, 164–173. https://doi.org/https://doi.org/10.0001/ialt_lti.v22i4.749
- Mora-Ortiz, R. S., & Rojas-González, E. (2012). Efecto de la saturación en el deslizamiento de talud en la comunidad San Juan de Grijalva, Chiapas. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 13, 55–68. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8556584>
- Ruan, S., Tang, L., & Huang, T. (2022). The Pullout Mechanical Properties of Shrub Root Systems in a Typical Karst Area, Southwest China. *Sustainability*, 14(6), 3297. <https://doi.org/10.3390/su14063297>
- Sanchez-Castillo, L., Kubota, T., Cantu-Silva, I., Yanez-Diaz, M., Hasnawir, & Pequeno-Ledezma, M. (2017). Comparisons of the Root Mechanical Properties of three Native Mexican Tree Species for Soil Bioengineering Practices. *Botanical Sciences*, 95(2), 259269. <https://doi.org/10.17129/botsci.802>
- Stokes, A., Douglas, G. B., Fourcaud, T., Giadrossich, F., Gillies, C., Hubble, T., Kim, J. H., Loades, K. W., Mao, Z., McIvor, I. R., Mickovski, S. B., Mitchell, S., Osman, N., Phillips, C., Poesen, J., Polster, D., Preti, F., Raymond, P., Rey, F., ... Walker, L. R. (2014). Ecological mitigation of hillslope instability: ten key issues facing researchers and practitioners. *Plant and Soil*, 377(1–2), 1–23. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2044-6>

Recibido:
30/agosto/2023

Aceptado:
12/enero/2024

- Valdés, R. O. A. (2016). Cómo las estructuras de las plantas protegen de los deslizamientos. *Revista Internacional de Desarrollo Regional Sustentable*, 1, 85–91. <http://rinderesu.com/index.php/rinderesu/article/view/8>
- Valdés-Rodríguez, O. A., Alonso, A. E. J., Martínez, A. S., & Andrade, J. T. (2020). Tension and bending tests in roots of two tropical species. *Madera y Bosques*, 26(2), 1–13. <https://doi.org/10.21829/MYB.2020.2621716>
- Vallarino, R., Mejía, G., Centella, D., & Grajales, S. F. (2021). Bioingeniería de taludes: evaluación del uso de árboles y arbustos como posible mecanismo para incrementar el factor de seguridad. *Revista de Iniciación Científica*, 7(2), 26–38. <https://doi.org/10.33412/rev-ric.v7.2.3336>
- Van Soest, P. J., Robertson, J. B., & Lewis, B. A. (1991). Methods for Dietary Fiber, Neutral Detergent Fiber, and Nonstarch Polysaccharides in Relation to Animal Nutrition. *Journal of Dairy Science*, 74(10), 3583–3597. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2)
- Vergani, C., Chiaradia, E. A., & Bischetti, G. B. (2012). Variability in the tensile resistance of roots in Alpine Forest tree species. *Ecological Engineering*, 46, 43–56. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.04.036>
- Yang, Y., Chen, L., Li, N., & Zhang, Q. (2016). Effect of Root Moisture Content and Diameter on Root Tensile Properties. *PLOS ONE*, 11(3), e0151791. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0151791>
- Zavala-González, R., Cantú-Silva, I., Sánchez-Castillo, L., González-Rodríguez, H., Kubota, T., & Hasnawir. (2019). Ten Native Tree Species for potential use in Soil Bioengineering in northeastern Mexico. *Botanical Sciences*, 97(3), 291–300. <https://doi.org/10.17129/botsci.2131>
- Zhang, C. B., Chen, L. H., & Jiang, J. (2014). Why fine tree roots are stronger than thicker roots: The role of cellulose and lignin in relation to slope stability. *Geomorphology*, 206, 196–202. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.09.024>