

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**USO POTENCIAL DE ESPECIES NATIVAS DEL NORESTE DE MÉXICO
PARA LA BIOINGENIERÍA DE SUELOS EN LA PREVENCIÓN DE
DESASTRES**

POR

M.C. REBECA GUADALUPE ZAVALA GONZÁLEZ

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MANEJO DE
RECURSOS NATURALES**

Julio, 2025

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO**



TESIS

**USO POTENCIAL DE ESPECIES NATIVAS DEL NORESTE DE MÉXICO
PARA LA BIOINGENIERÍA DE SUELOS EN LA PREVENCIÓN DE
DESASTRES**

POR

M.C. REBECA GUADALUPE ZAVALA GONZÁLEZ

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MANEJO DE
RECURSOS NATURALES**

LINARES, NUEVO LEÓN, MÉXICO

Julio, 2025

**USO POTENCIAL DE ESPECIES NATIVAS DEL NORESTE DE MÉXICO
PARA LA BIOINGENIERÍA DE SUELOS EN LA PREVENCIÓN DE
DESASTRES**

Aprobación de Tesis



Dr. Humberto González Rodríguez
Director



Dra. María Inés Yáñez Díaz
Codirector



Dr. Andrés Eduardo Estrada Castellón
Asesor



Dr. Fortunato Garza Ocañas
Asesor



Dr. Israel Cantú Silva
Asesor Externo

Julio, 2025

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por respaldar la realización de mis estudios de Doctorado en el programa “Doctorado con Orientación en Manejo de Recursos Naturales” de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León (FCFUANL), mediante la asignación de una beca, así como por el financiamiento de la investigación que sustenta este trabajo.

Expreso mi sincera gratitud a la Facultad de Ciencias Forestales, y de manera muy especial al Dr. Gerardo Cuellar Rodríguez, director de esta institución, así como a la Subdirección de Posgrado, por su gestión y apoyo durante mi formación.

A los distinguidos miembros de mi Comité Tutorial, mi más profundo reconocimiento: al Dr. Israel Cantú Silva por su extraordinaria visión, entrega, saber y capacidad de liderazgo; al Dr. Humberto González Rodríguez, por brindarme su apoyo constante y sin reservas para alcanzar esta meta; a la Dra. Inés Yáñez, por su orientación y aportaciones que enriquecieron significativamente esta línea de investigación; al Dr. Eduardo Estrada Castillón, por sus palabras de aliento y su acompañamiento académico en cada etapa de este proceso; y al Dr. Fortunato Garza Ocañas, por su permanente disposición y respaldo integral.

A los profesores de la Facultad de Ciencias Forestales, por haber compartido generosamente sus conocimientos y experiencias a lo largo de mi formación. Mi agradecimiento también al equipo administrativo de la Facultad de Ciencias Forestales, particularmente al personal del área de Posgrado, por su valiosa disposición y eficiencia en la gestión de trámites y documentación. A todos los integrantes del Laboratorio de Suelos y Nutrición de Bosques, quienes hicieron

de ese espacio mi segundo hogar, gracias por su colaboración y compañerismo.

A la Dra. Ma. Inés Yáñez Díaz, le debo un agradecimiento especial por sus contribuciones clave a esta investigación, así como por su infinita paciencia, generosidad, orientación, acompañamiento y amistad. Gracias, especialmente, por regalarme su tiempo, tan valioso e irremplazable.

Al equipo del laboratorio de Química de la Facultad, así como al laboratorio de Tecnología de la Madera, a mis colegas de Posgrado y a mis compañeros de generación, gracias por formar parte de este camino.

Al Ing. José Trinidad Martínez, con quien comencé a aprender desde 2014 en el “Proyecto Perdido”, gracias por alentarme a seguir en la senda de la investigación, por sus perspectivas, enseñanzas, orientación y confianza desde mucho antes de que esta tesis tomara forma. Gracias infinitas.

A mis amigos de toda la vida: Clarissa, Rubí, Diana, Marisela, Katia gracias por su lealtad y por permitir que aprendiera de sus saberes y experiencias. A quienes conocí durante el posgrado: Ale Galván, Daritsha, Becky Friesen y Anita, gracias por tu compañía en este trayecto. De manera muy especial, a Darwin, quien ha estado presente desde aquellas primeras exploraciones de campo en el verano de 2016.

Finalmente, a mis padres, a mi hermana y a la familia Zavala , gracias por confiar en mí sin reservas y por ser siempre una fuente de motivación, apoyo y fortaleza constante.

DEDICATORIA

A Dios

A mi familia,
por ser mi refugio y mi mayor fortaleza en cada etapa de este camino.

*A mis padres, por su amor incondicional, sus sacrificios silenciosos y su
confianza inquebrantable en mis sueños.*

*A mi hermana, por su compañía constante, sus palabras de aliento y su
apoyo inigualable.*

*A mi compañero de vida, Darwin Suárez Velázquez por darme ánimo y
fuerza para seguir. Sin su respaldo emocional y humano, este logro no
habría sido posible.*

EN MEMORIA

Amelia Elizondo Núñez y Juan Zavala Cabrera

ÍNDICE

ÍNDICE.....	i
ÍNDICE DE TABLAS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
RESUMEN	ix
SUMMARY.....	x
INTRODUCCIÓN.....	1
JUSTIFICACIÓN.....	2
HIPÓTESIS.....	3
OBJETIVOS.....	3
Objetivo general	3
Objetivos particulares.....	3
ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	4
CAPÍTULO I. PROPIEDADES MECÁNICAS DE RAÍCES DE ESPECIES NATIVAS DEL NORESTE DE MÉXICO	5
Resumen.....	5
Summary.....	6
1. Introducción	7
2. Materiales y métodos	9
2.1 Área de estudio.....	9
2.2 Procedimientos de muestreo de raíz	10
2.3 Determinación de las propiedades mecánicas de la raíz.....	11
2.4 Análisis estadístico	12
3. Resultados.....	14
3.1 Modelos de regresión para fuerza máxima de quiebre (F_{max} ; N)	15
3.2 Modelos de regresión para el módulo de elasticidad (E_{root})	16
3.3 Fuerza de tensión en raíces de especies arbóreas y su relación con el diámetro	17
4. Discusión.....	20
5. Conclusiones	21
CAPÍTULO II. COMPOSICIÓN QUÍMICA RADICULAR DE ESPECIES NATIVAS DEL NORESTE E DE MÉXICO	22

Resumen.....	22
Summary.....	24
1. Introducción.....	25
2. Materiales y métodos.....	28
2.1 Área de estudio.....	28
2.2 Selección de especies.	28
2.3 Descripción de las especies investigadas.....	29
2.4 Método de muestreo de las raíces.....	30
2.5 Preparación de muestras para caracterización morfológica radicular.	31
2.6 Preparación de las muestras de raíz para su análisis químico.	31
2.7 Determinación de composición química.	33
2.9 Análisis estadísticos.....	34
3 Resultados.....	35
3.1 Composición química de raíces de especies arbustivas.....	35
3.2 Modelos de regresión para lignina, hemicelulosa y celulosa.	38
3.3 Morfología de las raíces.....	42
3.4 Distribución de las especies nativas en una ladera.	45
4 Discusión	46
5 Conclusiones	52
Resumen.....	¡Error! Marcador no definido.

2.4 Análisis estadístico	¡Error! Marcador no definido.
4. Resultados	¡Error! Marcador no definido.
4.1 Composición química de raíces en especies arbóreas.....	¡Error! Marcador no definido.
4.2 Modelos de regresión para composición química. ...	¡Error! Marcador no definido.
4 Discusión	¡Error! Marcador no definido.
5 Conclusiones.....	¡Error! Marcador no definido.
CAPÍTULO III. EL EFECTO MECÁNICO DE LAS RAÍCES DE ESPECIES ARBÓREAS NATIVAS SOBRE LA RESISTENCIA AL CIZALLAMIENTO DEL SUELO EN LAS LADERAS DE LA SIERRA MADRE ORIENTAL, MÉXICO.53	
Resumen.....	53
Abstract	54
1. Introducción	55
2. Materiales y métodos	57
2.1 Área de estudio.....	57
2.2 Procedimientos de muestreo y raíz	57
2.3 Selección de especies	57
2.4 Determinación de la relación del área de la raíz.....	58
2.5 Estimación de la cohesión suelo-raíz.....	59
2.6 Análisis estadístico	60
3. Resultados	61
3.1 Área de radio de raíz (RAR)	61
3.2 Cohesión de la raíz (Cr)	62
4. Discusión	65
5. Conclusiones	68
BIBLIOGRAFÍA.....	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias en Fmax y Eroot entre especies y diámetros de raíces.	14
Tabla 2 . Resultados del ANOVA para comparar la fuerza de tensión de las raíces (Ts) dentro de las especies, el diámetro de las raíces y su interacción.	15
Tabla 3. Parámetros calculados (valores a y b) y valores R2 ajustados para las relaciones de potencia, en cuatro especies de árboles nativos.	19
Tabla 4. Resultados del análisis de varianza de acuerdo a un experimento factorial con diseño completamente aleatorio para la variable contenido de celulosa entre las diferentes especies (Factor A), diámetros (Factor B) e interacción especie × diámetro (AB). E	35
Tabla 5. Prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias en los contenidos de lignina y hemicelulosa entre especies y diámetros de la raíz. 38	
Tabla 6. Correlaciones de Spearman para las variables lignina, hemicelulosa y celulosa.	42
Tabla 7. Descripción y caracterización morfológica radicular de cada una de las especies estudiadas bajo la metodología de Styczen y Morgan (1995)... 44	
Tabla 8 . ANOVA para la variable FDN para especie, diámetro y su interacción	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 9 .Resultados del ANOVA según un experimento factorial para la variable FDA, entre especies (Factor A), diámetros (Factor B) e interacción especie × diámetro (AB).....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 10 . Resultados de la prueba de Kruskal-Wallis para lignina, celulosa y hemicelulosa por especie y diámetro.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 11 . Coeficientes de correlación de Spearman (n = 96) para las variables lignina, hemicelulosa y celulosa.	¡Error! Marcador no definido.

Tabla 12. Valores P de la prueba de Kruskal-Wallis, que indican la significancia ($p = 0.05$) entre la cohesión de la raíz (Cr) y los valores medios de RAR.....	61
Tabla 13 . Medias del radio de área de raíz (RAR) a diferentes profundidades del suelo en cuatro especies de árboles nativos.	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Área de estudio. La imagen muestra la ubicación de los flancos de la montaña Chipinque en Nuevo León, México.....	9
Figura 2 Ejemplos de raíces extraídas muestreadas en el área de estudio: a) <i>Celtis laevigata</i> , b) <i>Quercus rysophylla</i> , c) <i>Cercis canadensis</i> , d) <i>Ligustrum lucidum</i>	10
Figura 3. Correcta colocación y prueba de raíces en la Máquina Universal de Ensayo SHIMADZU tipo SLFL-100Kn y su visualizador Trapezium.	11
Figura 4 Relación entre el diámetro de la raíz y la fuerza máxima de quiebre (Fmax) en las especies ensayadas. n = 24	16
Figura 5 Relación entre el diámetro de la raíz y el módulo de elasticidad (Eroot) en las especies probadas, n = 24.	17
Figura 6 Relación entre la fuerza de tensión de la raíz (Ts; N /mm ²) y el diámetro de la raíz (D; mm) para las raíces de cuatro especies nativas. Ts representa los valores de la fuerza de tensión de la raíz de acuerdo con las ecuaciones enumeradas en la Tabla 4.	18
Figura 7 a) Proceso de molido de material; b) Muestra de raíz molida, y c) División por categoría diamétrica.	32
Figura 8 Sistema radicular de individuos de <i>Erythrostemon mexicana</i> ; b) Secciones del sistema radicular de <i>Broussonetia papyrifera</i> ; c) Sistema radicular de <i>Broussonetia papyrifera</i>	33
Figura 9 Valores medios del contenido de celulosa en cinco especies nativas. Medias con letras diferentes indican diferencias estadísticas de acuerdo a la prueba de Tukey (P =.05).	36
Figura 10 Valores medios del contenido de celulosa para tres categorías diamétricas, categoría III (6.1 a 9.9 mm) categoría II (2.9 a 6.0 mm) y categoría I (0.1 a 2.9 mm). Medias con letras diferentes indican diferencias estadísticas (Tukey P =.05).	37

Figura 11 Modelos de regresión para la relación del contenido de lignina como función del diámetro de raíces en diferentes especies arbustivas, n =25.....	39
Figura 12 Modelos de regresión entre la hemicelulosa y el diámetro de las raíces en diferentes especies arbustivas, n =25.	40
Figura 13 Modelos de regresión entre el contenido de celulosa y el diámetro de las raíces en diferentes especies arbustivas, n =25	40
Figura 14 Relación del contenido de humedad de la raíz en cinco especies arbustivas respecto a la clasificación diamétrica de la raíz: categoría III (6.1 a 9.9 mm), categoría II (2.9 a 6.0 mm) y categoría I (0.1 a 2.9 mm).	41
Figura 15 Representación de un sistema de revegetación con especies nativas, respecto a su sistema radicular y composición química para fijación del suelo en una ladera típica de la Sierra Madre Oriental.	45
Figura 16 Valores promedio de contenido de FDN en cuatro especies nativas. Medias con letras diferentes indican diferencias estadísticas según la prueba de Tukey (p = 0,05). Las barras de error indican la desviación estándar (n = 24).	¡Error! Marcador no definido.
Figura 17 Valores promedio de contenido de FDA en cuatro especies nativas. Medias con letras diferentes indican diferencias estadísticas según la prueba de Tukey (p = 0.05). Las barras de error indican la desviación estándar (n = 24).	¡Error! Marcador no definido.
Figura 18 Relación entre el diámetro de la raíz y el contenido de lignina en cuatro especies nativas, n = 24.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 19 Relación entre el diámetro de la raíz y el contenido de celulosa en cuatro especies nativas, n = 24.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 20 Relación entre diámetro de raíz y contenido de hemicelulosa en cuatro especies nativas, n = 24.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 21 Relación entre el diámetro de la raíz y el contenido de FDN en cuatro especies nativas, n = 24.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 22 Relación entre el diámetro de la raíz y el contenido de FDA en cuatro especies nativas, n = 24.	¡Error! Marcador no definido.

Figura 23 Ejemplos de raíces extraídas muestreadas en el área de estudio: a) <i>Celtis laevigata</i> , b) <i>Quercus rysophylla</i> , c) <i>Cercis canadensis</i> , d) <i>Ligustrum lucidum</i>	58
Figura 24 Distribución de la relación del área de la raíz (RAR,%) con la profundidad (1 = 0-10 cm; 2 = 10-20 cm; 3 = 20-30 cm; 4 = 30-40 cm; 4 = 40- 50 cm) para cuatro especies de árboles nativos.....	62
Figura 25 . Relación entre la distribución de la cohesión radicular del suelo (Cr, kN / m ²) con el perfil de profundidad del suelo (1 = 0-10 cm; 2 = 10-20 cm; 3 = 20-30 cm; 4 = 30-40 cm ; 4 = 40-50 cm) para cuatro especies de árboles nativos.....	63

RESUMEN

La incorporación de vegetación en estrategias de bioingeniería para mitigar riesgos naturales se ha consolidado como una práctica cada vez más común. La eficacia de esta intervención en la estabilización del suelo está estrechamente vinculada a las propiedades mecánicas de las especies vegetales empleadas, las cuales resultan de la interacción entre sus atributos químicos, anatómicos y morfológicos del sistema radicular. La investigación se llevó a cabo dentro de la SMO, en la montaña Chipinque, en el municipio de San Pedro, N.L. Con la finalidad de entender mejor el rol de las raíces en la prevención de deslizamientos se estudian por separado las propiedades mecánicas (fuerza de quiebre; F_{max} , fuerza de tensión; T_s y módulo de elasticidad; E_{root}), composición química (% de lignina, %celulosa y %hemicelulosa) e interacción mecánica raíz/suelo (RAR y C_r) y se compara con el diámetro y las especies de las raíces. El orden de importancia de las especies respecto a sus altos valores de T_s y E_{root} es el siguiente: *Celtis laevigata* > *Quercus rysophylla* > *Cercis canadensis* > *Ligustrum lucidum*. Los contenidos más altos de celulosa se encontraron en la categoría diamétrica I (raíces de diámetro pequeño) por lo que se atribuye a esta los altos valores de T_s . La relación RAR más alta se encontró también en *Celtis laevigata* (0-10 cm) seguida de *Quercus rysophylla* > *Cercis canadensis* > *Ligustrum lucidum*. El C_r más alto se encontró en *Celtis laevigata* (287.05 kN/m²) a la profundidad 1 (0-10 cm) seguido de *Quercus rysophylla* > *Cercis canadensis* > *Ligustrum lucidum*. Todas las especies mostraron las mayores RAR y C_r a la profundidad 1 (0-10 cm).

SUMMARY

The use of vegetation applied in bioengineering techniques for disaster prevention has become a recurring practice. The degree of contribution of this to the soil will depend on the mechanical properties of the plants, which are combined functions of the chemical, anatomical and morphological characteristics of the root system. The investigation was carried out within the SMO, in the Chipinque, mountain in San Pedro, N.L. In order to have a better understanding of the role of roots in the prevention of landslides, the mechanical properties (maximum force to breakage; F_{max} , tensile strength; T_s and modulus of elasticity; E_{root}) are studied, chemical composition (% of lignin, % cellulose and % hemicellulose) and root / soil mechanical interaction (RAR and C_r) and compared with the diameter and species of the roots. The order of importance of the species with respect to their high T_s and E_{root} values is the following: *Celtis laevigata* > *Quercus rysophylla* > *Cercis canadensis* > *Ligustrum lucidum*. The highest cellulose contents were found in the diameter category I (small diameter roots), which is why the high T_s values are attributed to this. The highest RAR ratio was also found in *Celtis laevigata* (0-10 cm) followed by *Quercus rysophylla* > *Cercis canadensis* > *Ligustrum lucidum*. The highest C_r was found in *Celtis laevigata* (287.05 kN/m²) at depth 1 (0-10 cm) followed by *Quercus rysophylla* > *Cercis canadensis* > *Ligustrum lucidum*. All species showed the highest RAR and C_r at depth 1 (0-10 cm).

INTRODUCCIÓN

La erosión del suelo en sus diferentes formas afecta tanto a los anticlinales como a los sinclinales de los grandes orógenos, topografías de bajo y alto ángulo y suelos con diferente génesis. La presencia de vegetación reduce la erosión del suelo y el deslizamiento de pendientes poco profundas al influir en las condiciones geomecánicas del suelo. Por esta razón, las estrategias de vegetación en áreas vulnerables a la erosión se consideran una medida eficaz de control para la erosión del suelo.

La vegetación como factor de control de la erosión, en un caso específico para mitigar deslizamientos de suelo poco profundos, se puede explicar debido al aumento de la resistencia al corte del suelo en una pendiente inestable (Operstein y Frydman, 2000; Genet *et al.*, 2005). Las raíces de las plantas pueden proporcionar una cohesión aparente a la resistencia al corte del suelo (Fan y Su, 2008; Zhang *et al.*, 2010; Zang *et al.*, 2014). Los factores sustanciales que influyen en la resistencia al cizallamiento del suelo con raíces son la cantidad y distribución direccional de las raíces, así como su fuerza de tensión, resistencia al cizallamiento del suelo e interacción suelo-raíz (Genet *et al.*, 2005). Características de las raíces como el diámetro, la orientación y el anclaje son factores importantes para considerar (Gray y Sotir, 1996; Genet *et al.*, 2005). Entre estos factores, el diámetro de la raíz es el más importante debido a su relación de poder con la fuerza de tensión (Bischetti *et al.*, 2005; Mattia *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2014).

JUSTIFICACIÓN

La mayoría de los procesos de movimiento en masas que se han producido en México en las últimas décadas han sido inducidos por la lluvia. De acuerdo con lo mencionado anteriormente y para reconocer la influencia de los rasgos mecánicos de las raíces, se realizó una investigación para contribuir a la comprensión de la estabilidad de suelos a través de raíces de especies nativas. El área de estudio se ubica dentro del Área Metropolitana de Monterrey (AMM) perteneciente al estado de Nuevo León, México, y se ubica en el borde de la Cordillera de la Sierra Madre Oriental (SMO). Las características del sitio, incluidas las geológicas, geomorfológicas y climáticas, son responsables del desarrollo de varios movimientos de masas (Arrieta *et al.*, 2010).

Los problemas de inestabilidad de los taludes en la zona de estudio son bien conocidos, por lo que la continua construcción y el establecimiento de viviendas en esta sierra sigue siendo un problema. En el estudio actual, nuestro objetivo es comprender mejor las propiedades mecánicas de las especies nativas del noreste de México y también cuantificar su papel en el aumento de la cohesión del suelo que puede conducir a la fijación del suelo y una mayor resistencia del suelo contra la erosión

HIPÓTESIS

Las propiedades mecánicas (fuerza máxima de quiebre, fuerza de tensión y módulo de elasticidad) y la composición química (contenidos de lignina, hemicelulosa, y celulosa) es diferente entre especies e influenciada por su diámetro.

OBJETIVO

Objetivo general

Cuantificar las propiedades mecánicas y químicas de cuatro especies nativas del noreste de México y también evaluar su contribución en el aumento de la cohesión del suelo que puede conducir a una mayor resistencia del suelo contra la erosión.

Objetivos particulares

1. Evaluar tres propiedades mecánicas (F_{max} , T_s y E_{root}) en cuatro especies nativas.
2. Cuantificar la composición química (lignina, celulosa y hemicelulosa) en cinco especies nativas y su relación con la fijación del suelo.
3. Explicar la relación entre las propiedades mecánicas de raíces de especies nativas y la cohesión del suelo.

ESTRUCTURA DE LA TESIS

Esta investigación se organiza en capítulos, cada uno diseñado para abordar de manera específica los objetivos propuestos. El trabajo inicia con una introducción general que contextualice el rol de la vegetación en la mecánica del suelo, así como la influencia de las propiedades planteadas en los objetivos de la presente investigación. En el capítulo I, se evalúan las propiedades mecánicas, fuerza máxima de quiebre (F_{max}), fuerza de tensión (T_s) y módulo de elasticidad (E_{root}) de raíces de especies nativas y su relación con la especie y el diámetro; se realizaron pruebas estadísticas para determinar diferencias significativas. En el capítulo II, se analizan la composición química de raíces de especies nativas y su relación con el diámetro; se realizaron pruebas estadísticas para establecer diferencias significativas entre los componentes, el diámetro y las especies. Así mismo, se explica la relación entre la composición química de las raíces y la fijación del suelo. El capítulo III, incluye las propiedades mecánicas en el cálculo de su contribución a la cohesión del suelo junto con las variables área de radio de raíz (RAR) y cohesión de raíz (C_r). Por último, se presenta en cada uno de los capítulos una conclusión de lo obtenido en la investigación.

CAPÍTULO I. PROPIEDADES MECÁNICAS DE RAÍCES DE ESPECIES NATIVAS DEL NORESTE DE MÉXICO

Resumen

Las propiedades mecánicas de las raíces ayudan a mejorar la mecánica del suelo y, en consecuencia, aumentan la estabilidad de la pendiente. La fuerza máxima de quiebre de las raíces, el módulo de elasticidad y la fuerza de tensión juegan un papel importante en la cohesión del suelo. Las cuatro especies nativas utilizadas en esta investigación se encuentran presentes en las laderas de la montaña Chipinque dentro de la cordillera de la Sierra Madre Oriental: *Cercis canadensis*, *Celtis laevigata*, *Quercus rysophylla* y *Ligustrum lucidum*. Con el fin de investigar las características mecánicas de las raíces de estas especies, se muestrearon y probaron raíces individuales para determinar su fuerza máxima de quiebre ($F_{\max}$; N), fuerza de tensión (T_s ; N/mm²) y módulo de elasticidad (E_{root} ; N/mm²). Las pruebas se realizaron con la Máquina de Ensayo Universal Shimadzu tipo SLFL-100KN. Los resultados confirmaron que la fuerza máxima de quiebre de la raíz aumenta cuando aumenta el diámetro de la raíz y el módulo de elasticidad y la fuerza de tensión disminuyen al aumentar el diámetro de la raíz para las cuatro especies. Los resultados de las especies arbóreas muestran que las raíces *C. laevigata* tienen mayor fuerza de tensión, seguidas de *Q. rysophylla* > *C. canadensis* > *L. lucidum*.

Palabras clave: fuerza máxima de quiebre, fuerza de tensión, módulo de elasticidad

Summary

Root mechanical properties help to improve soil mechanics and consequently, slope stability suffers. Maximum force to root breakage, modulus of elasticity and tensile strength play an important role on soil cohesion. The four native species used in this research are present on the slopes of the Chipinque mountain within Sierra Madre Oriental Mountain range: *Cercis canadensis*, *Celtis laevigata*, *Quercus rysophylla* and *Ligustrum lucidum*. In order to investigate the mechanical characteristics of the roots of these species, individual roots were sampled and tested to determine their maximum force to root breakage ($F_{\max}$; N), tensile strength (T_s ; N/mm²) and modulus of elasticity (E_{root} ; N/mm²). The tests were carried out with the Shimadzu Universal Testing Machine type SLFL-100KN. Our results confirmed that maximum force to root breakage increases with increasing root diameter and the modulus of elasticity and tensile strength decreases with increasing root diameter for all four species. The results of the tree species showed that the roots of *C. laevigata* have the highest tensile strength, followed by *Q. rysophylla* > *C. canadensis* > *L. lucidum*.

Keywords: maximum force to root breakage, tensile strength, modulus of elasticity

1. Introducción

Los deslizamientos superficiales representan una amenaza considerable para las personas y las estructuras, generando impactos sociales, económicos y ecológicos relevantes. La cobertura vegetal desempeña un papel fundamental en la estabilización de suelos con considerable inclinación angular y en la mitigación de la erosión, principalmente mediante sus efectos mecánicos sobre las propiedades del suelo. (Zhang *et al.*, 2008; Comino y Druetta, 2010). Cada componente de una planta tiene una función, las raíces en este caso han sido consideradas como una técnica fundamental en la estabilización de taludes y el control de la erosión (Wu *et al.*, 1979), principalmente por sus efectos mecánicos (Simon *et al.*, 2006). La presencia de raíces como material con fuerte fuerza de tensión en suelos con tensión débil proporciona un material compuesto con resistencia al cizallamiento, una mayor resistencia al cizallamiento del suelo resulta en una pendiente con mayor estabilidad (Pollen 2007; De Baets *et al.*, 2008).

Investigaciones anteriores atribuyen a las características biotécnicas el control del efecto de fijación o refuerzo de las raíces dentro de las que mencionan la fuerza de tensión (T_s ; N/mm²) de las raíces (Gray y Sotir, 1996). Además, la fuerza de tensión de las raíces se considera un factor importante que gobierna la cantidad de fijación y estabilización del suelo (Mattia *et al.*, 2005; Pollen, 2007; Genet *et al.*, 2008). Esta propiedad se ve afectada por muchos parámetros bióticos y factores abióticos, como las especies de plantas y la edad (Gray y Sotir, 1996; Nilaweera y Nutalaya, 1999; Schmid y Kazda, 2001; Genet *et al.*, 2008).

El conocimiento de las propiedades mecánicas de las raíces, como la fuerza de quiebre, la fuerza de tensión y el módulo de elasticidad se puede utilizar para cuantificar el efecto de diferentes plantas en las medidas de control de la erosión (Pollen, 2007), sin dejar a un lado que la fuerza de tensión de las raíces se considera un factor importante que gobierna la cantidad de fijación y estabilización del suelo (Mattia *et al.*, 2005; Pollen, 2007; Genet *et al.*, 2008).

El objetivo de este capítulo es evaluar las propiedades mecánicas en raíces, tales como fuerza máxima de quiebre $F_{\max}$, fuerza de tensión (T_s) y módulo de elasticidad (E_{root}) en cuatro especies nativas: *Celtis laevigata*, *Quercus rysophylla*, *Cercis canadensis*, *Ligustrum lucidum* Así mismo analizar sus tendencias respecto al diámetro de la raíz, clasificado en tres categorías diamétricas: I, II y III.

2. Materiales y métodos

2.1 Área de estudio

La investigación se desarrolló en las laderas del Cerro Chipinque, localizado en el sector septentrional de la Sierra Madre Oriental, en el noreste de México (Figura 1). Esta región montañosa presenta una marcada variabilidad climática asociada a la altitud y a la posición geográfica. La elevación del sitio de estudio oscila entre los 750 y los 2200 metros sobre el nivel del mar, dentro de las coordenadas geográficas $100^{\circ} 18'$ a $100^{\circ} 24'$ longitud oeste y $25^{\circ} 33'$ a $25^{\circ} 35'$ latitud norte. De acuerdo con la clasificación climática de Köppen (1936), modificada por García (1973), el clima corresponde al tipo BS1 (h') hw (e') w", caracterizado como semiárido con precipitaciones concentradas en la temporada estival. La temperatura media anual es de 20.5°C y la precipitación pluvial promedio anual alcanza los 595 mm. En cuanto a la edafología, predominan los suelos del tipo litosol y rendzina. (INEGI, 1986).

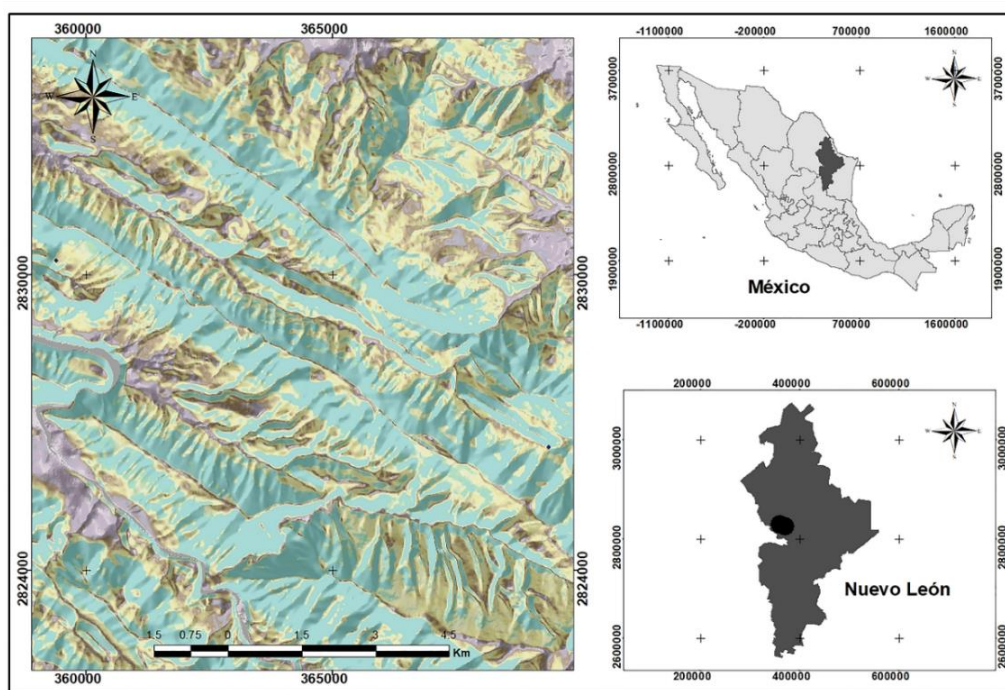


Figura 1. Área de estudio. La imagen muestra la ubicación de los flancos de la montaña Chipinque en Nuevo León, México.

2.2 Procedimientos de muestreo de raíz

Se seleccionaron cuatro especies de árboles nativos para la prueba de fuerza de tensión, fuerza de quiebre y módulo de elasticidad. El muestreo de raíces de cada especie se realizó de forma manual y luego se seleccionaron aleatoriamente 5 individuos por especie (Zavala *et al.*, 2019). Las raíces se extrajeron de sistemas de raíces expuestos con el propósito de una perturbación mínima en el área (Sánchez *et al.*, 2017b) y un sistema de raíces completo para procedimientos futuros.

La selección de especies se realizó teniendo en cuenta sus características nativas: distribución natural, abundancia y presencia en zonas de ladera. De esta forma, las especies consideradas fueron: *Cercis canadensis* L. (Fabaceae), *Celtis laevigata* Willd. (Cannabaceae), *Quercus rysophylla* Weath. (Fabaceae) y *Ligustrum lucidum* W.T. Aiton (Oleaceae) (Figura 2).

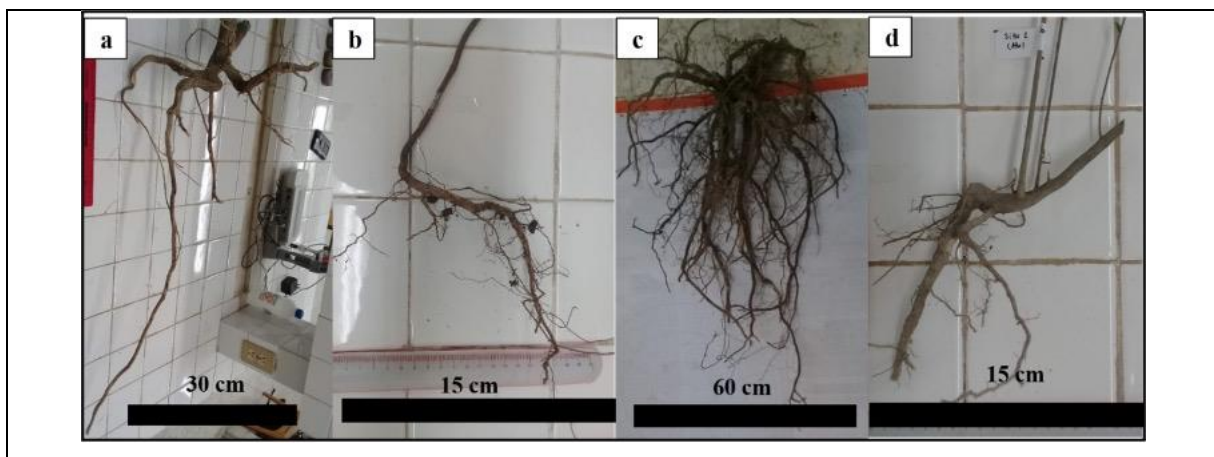


Figura 2. Ejemplos de raíces extraídas muestreadas en el área de estudio: a) *Celtis laevigata*, b) *Quercus rysophylla*, c) *Cercis canadensis*, d) *Ligustrum lucidum*.

Las muestras se extrajeron y se almacenaron en bolsas de papel. Para preservar su contenido de humedad, se almacenaron en un recipiente adecuado en el momento de la extracción. Las propiedades morfológicas de las raíces se determinaron *in situ* antes de tomar fotografías y muestrear las raíces. Las muestras recolectadas fueron trasladadas a los laboratorios correspondientes de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

2.3 Determinación de las propiedades mecánicas de la raíz

Se realizaron ensayos mecánicos en un total de 120 segmentos radiculares con diámetros entre 0.1 y 0.9 mm, distribuidos en 30 muestras por especie. La evaluación se efectuó utilizando una Máquina Universal de Ensayo SHIMADZU, modelo SLFL-100KN. Las raíces fueron posicionadas de forma vertical, sujetadas en ambos extremos y sometidas a una prueba de tracción a una velocidad constante de 10 mm/min (Figura 3). Posterior a cada ensayo, se registró el diámetro en el punto de ruptura (mm) de cada muestra. La adquisición y visualización de los datos se realizó mediante el software especializado Trapezium, integrado al sistema de ensayo de materiales.

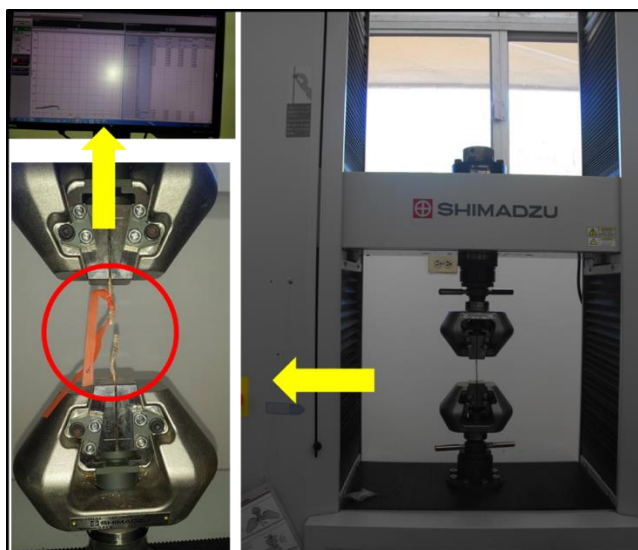


Figura 3. Correcta colocación y prueba de raíces en la Máquina Universal de Ensayo SHIMADZU tipo SLFL-100Kn y su visualizador Trapezium.

Ensayo de fuerza de tensión. La fuerza aplicada (N) requerida para romper la raíz se tomó como una medida de la ruptura de la raíz para calcular la fuerza de tensión (T_s , N/mm²).

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

Dónde: $F_{\max}$ es la fuerza máxima de quiebre de la raíz (N) y D es el diámetro medio de la raíz (mm) (Mattia *et al.*, 2005, Bischetti *et al.*, 2005, De Baets *et al.*, 2008, Genet *et al.*, 2005).

Las propiedades elásticas de cada muestra de raíz se determinaron utilizando el módulo de elasticidad (E_{root}) como:

$$E_{\text{root}} = (F_{\max} / A_0) CE / L_0$$

Dónde: $F_{\max}$ es la fuerza máxima aplicada al objeto bajo tensión, A_0 es el área de la sección transversal original, CE es el cambio de longitud de la muestra y L_0 es la longitud original (Ammann *et al.*, 2009; Zavala *et al.*, 2019).

2.4 Análisis estadístico

Con el propósito de comprobar los supuestos estadísticos de normalidad y homogeneidad de varianzas, se utilizó la prueba de Shapiro-Wilk para analizar la distribución de los datos, y la prueba de Levene para evaluar la igualdad de varianzas en las variables mecánicas. La fuerza de tensión (T_s) cumplió con el criterio de normalidad, por lo cual fue evaluada mediante un análisis de varianza bifactorial (ANOVA de dos vías). En contraste, la carga máxima antes de la ruptura ($F_{\max}$) y el módulo de elasticidad de la raíz (E_{root}) no presentaron una distribución normal, lo que motivó el uso del procedimiento no paramétrico de Kruskal-Wallis, conforme a lo descrito por Sokal y Rohlf (2003), para su análisis estadístico.

Los valores correspondientes a la fuerza máxima de ruptura, resistencia a la tracción y módulo de elasticidad fueron procesados mediante el software estadístico SPSS, versión estándar 13.0 para el sistema operativo Windows (SPSS Inc., Chicago, IL.). Se generaron modelos de regresión para todas las especies de diámetro respecto a las variables mecánicas ($p < 0.01$).

3. Resultados

Para las propiedades mecánicas se analizaron un total de 96 muestras, 24 de cada especie: *Cercis canadensis*, *Celtis laevigata*, *Quercus rysophylla* y *Ligustrum lucidum*.

Según los resultados derivados del análisis no paramétrico de Kruskal-Wallis, no se identificaron diferencias estadísticamente significativas entre especies para las variables F_{max} y E_{root} . No obstante, el análisis del diámetro de raíz reveló diferencias altamente significativas ($p \leq 0.01$). (Tabla 1).

Tabla 1. Prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias en F_{max} y E_{root} entre especies y diámetros de raíces.

Fuente	Estadístico	F_{max}	E_{root}
Especie	χ^2	3.236	0.414
	gl	3	3
	valor p	0.357	0.937
Diámetro	χ^2	67.015	52.757
	gl	2	2
	valor p	<.001	<.001

Los resultados del ANOVA bidireccional para la fuerza de tensión de la raíz no mostraron diferencias significativas entre las especies ($p=0.148$) ni para la interacción Especie*Diámetro. Por otro lado, la variable diámetro mostró diferencias significativas ($p=0.05$) (Tabla 2).

Tabla 2. Resultados del ANOVA para comparar la fuerza de tensión de las raíces (T_s) dentro de las especies, el diámetro de las raíces y su interacción.

Fuente	Estadístico	gl	Media	Valor F	Valor P
Especie (Sp)	309.781	3	103.260	2.357	0.148
Diámetro (D)	44,239.916	101	438.019	9.998	<0.001
Sp*D	1,021.923	7	145.989	3.332	0.057
Error	350.489	8	43.811		

3.1 Modelos de regresión para fuerza máxima de quiebre (F_{max} ; N)

La fuerza máxima de quiebre (F_{max} , N) aumenta cuando el diámetro de aumentó, este fenómeno se encontró en todas las especies. Esta propiedad varió de 12.50 N en *Cercis canadensis* a 815.63 N en la misma especie. Todas las regresiones simples para F_{max} se ajustaron a un modelo potencial con los siguientes coeficientes de determinación: *Cercis canadensis* ($R^2 = 0.8995$), *Celtis laevigata* ($R^2 = 0.8308$), *Quercus rysophylla* ($R^2 = 0.9565$) y *Ligustrum lucidum* ($R^2 = 0.7771$); la variable diámetro explica significativamente la F_{max} a partir de los coeficientes de determinación (Figura 4).

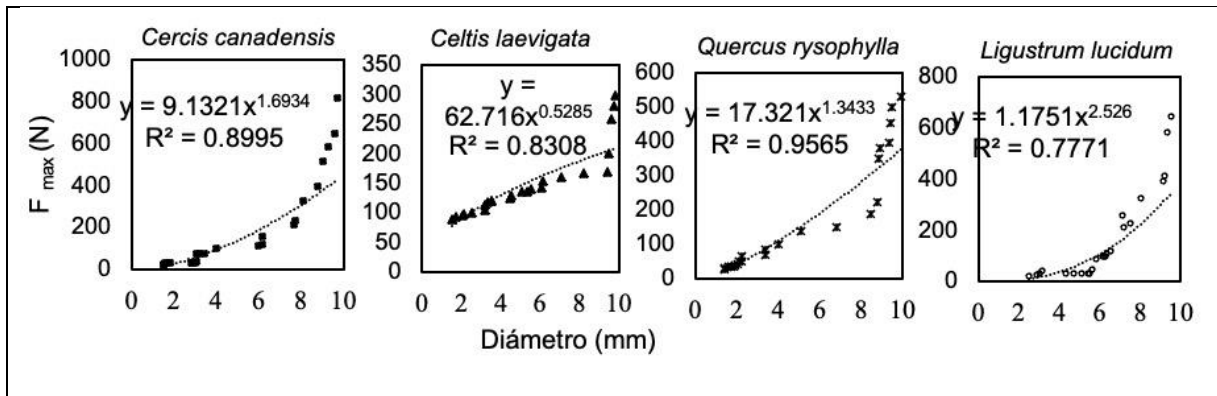


Figura 4. Relación entre el diámetro de la raíz y la fuerza máxima de quiebre ($F_{\max}$) en las especies estudiadas ($n = 24$).

3.2 Modelos de regresión para el módulo de elasticidad (E_{root})

El módulo de elasticidad (E_{root} ; N/mm^2) disminuye cuando aumenta el diámetro; este fenómeno se encontró en todas las especies. Esta propiedad varió de 15.0 N/mm^2 en *Celtis laevigata* a 245 N/mm^2 en la misma especie. Todas las regresiones negativas simples para E_{root} se ajustaron a un modelo potencial con los siguientes coeficientes de determinación: *Cercis canadensis* ($R^2 = 0.481$), *Celtis laevigata* ($R^2 = 0.969$), *Quercus rysophylla* ($R^2 = 0.784$) y *Ligustrum lucidum* ($R^2 = 0.780$); el diámetro explica significativamente la variable a partir de los coeficientes de determinación (Figura 5).

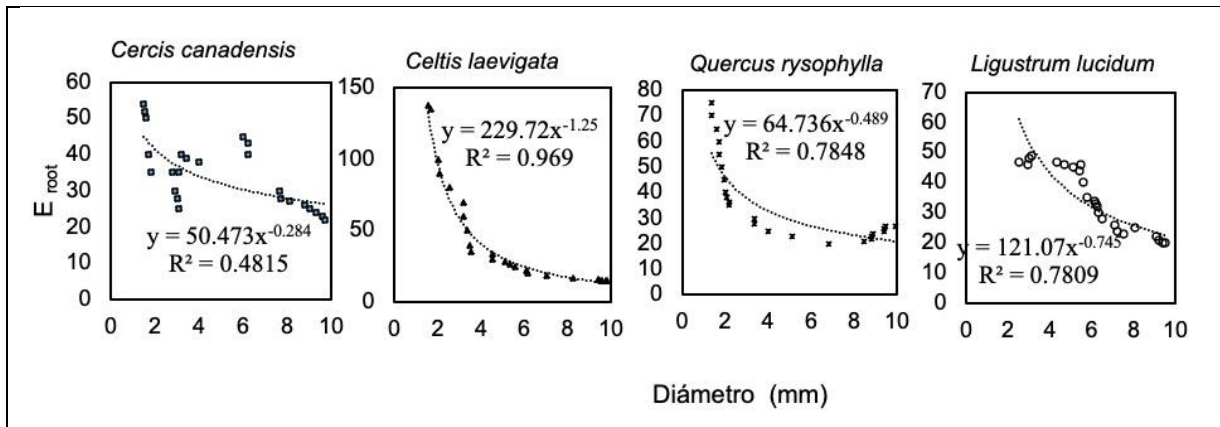


Figura 5. Relación entre el diámetro de la raíz y el módulo de elasticidad (E_{root}) en las especies estudiadas ($n = 24$).

3.3 Fuerza de tensión en raíces de especies arbóreas y su relación con el diámetro

Al considerar la totalidad de los valores de fuerza de tensión obtenidos para las cuatro especies evaluadas, se observaron rangos que van desde 156.56 N/mm² en *Celtis laevigata* hasta 3.58 N/mm² en *Ligustrum lucidum*. En todas las especies analizadas, se evidenció una disminución en la fuerza de tensión (T_s) conforme aumenta el diámetro de la raíz (D). La relación entre T_s y D para cada una de las especies se representa en la Figura 6.

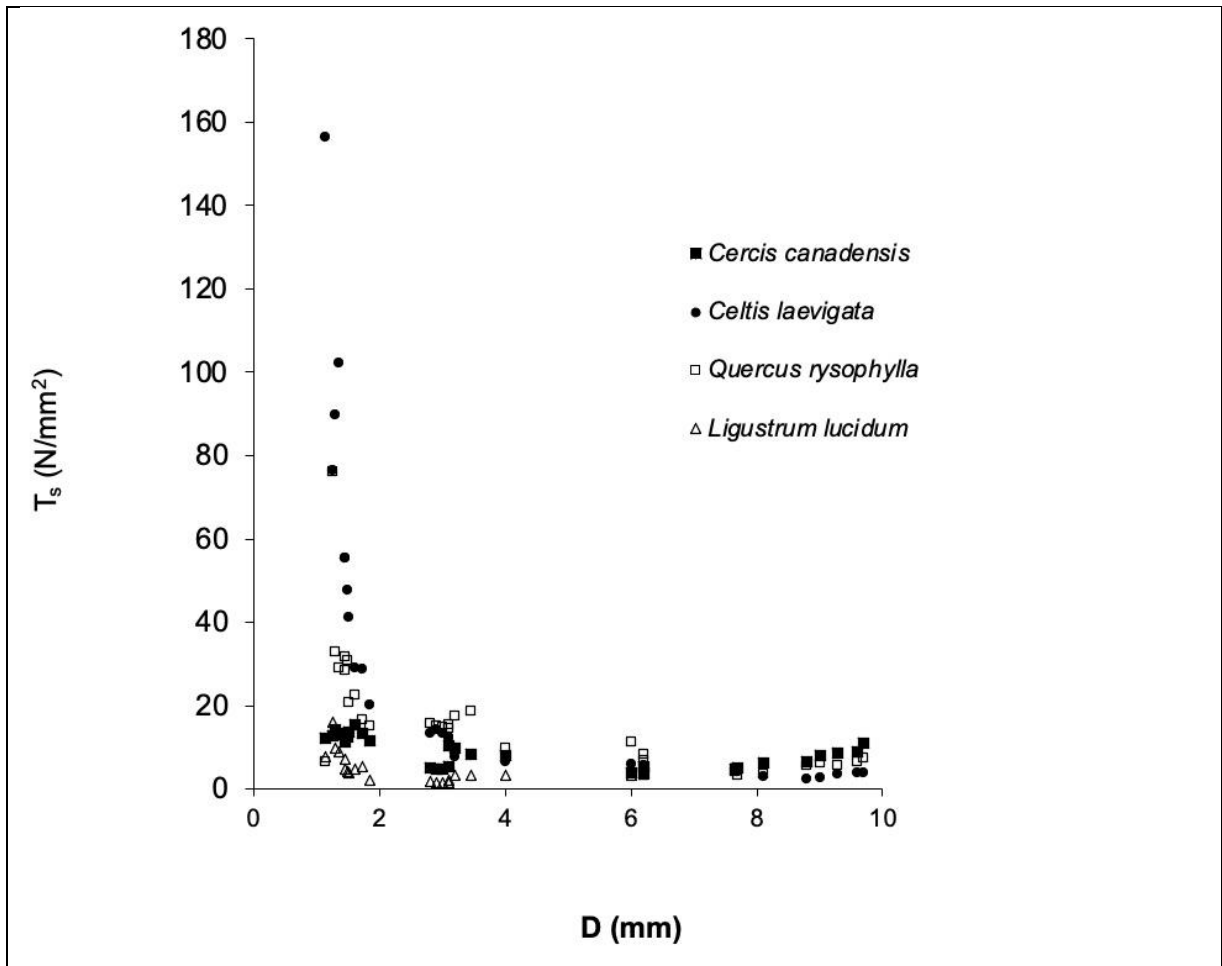


Figura 6. Relación entre la fuerza de tensión de la raíz (T_s ; N/mm^2) y el diámetro de la raíz (D ; mm) para las raíces de cuatro especies nativas. T_s representa los valores de la fuerza de tensión de la raíz de acuerdo con las ecuaciones enumeradas en la Tabla 3.

Los parámetros y los valores R^2 ajustados para la regresión de potencia establecida y el rango de diámetro por el cual se realizaron las pruebas fuerza de tensión se indican en la Tabla 3 para cada especie.

Tabla 3. Parámetros calculados (valores β_1 y β_0) y valores R^2 ajustados para las relaciones de potencia, en cuatro especies de árboles nativos.

Especie	Rango (mm)	Parámetro			
		β_1	β_0	n	R^2
<i>C. canadensis</i>	1.15-9.71	12.968	-0.37	30	0.40
<i>C. laevigata</i>	1.30-9.91	87.44	-1.55	30	0.92
<i>Q. rysophylla</i>	1.34-9.29	34.063	-0.82	30	0.68
<i>L. lucidum</i>	1.26-9.61	6.9394	-0.70	30	0.35

4. Discusión

En todas las especies analizadas, se observó una tendencia creciente de la fuerza máxima de quiebre ($F_{\max}$; N) conforme se incrementa el diámetro de la raíz. Así mismo, la fuerza máxima de quiebre ($F_{\max}$; N) se comporta inversamente a la fuerza de tensión (T_s ; N/mm²) en todas las especies investigadas. Teniendo en cuenta esta afirmación, la fuerza de tensión (T_s ; N/mm²) en todas las especies es mayor en diámetros pequeños (Categoría I; 0.1 a 2.9 mm) y menor en diámetros grandes (Categoría III; 6.1 a 9.9 mm). La fuerza máxima de quiebre ($F_{\max}$; N) se correlaciona significativa y negativamente con el módulo de elasticidad, por lo que se puede saber que la fuerza de tensión (T_s ; N/mm²) y el módulo de elasticidad (E_{root} ; N/mm²) se correlacionan positivamente con el otro.

Generalmente, la fuerza de tensión se puede predecir bien por el diámetro de la raíz y, por lo tanto, los valores medios de la fuerza de tensión se usarán para predecir la contribución de la raíz a la resistencia al corte. Los valores máximos de fuerza de tensión de la raíz registrados durante la prueba ascienden a 156 N/mm² para *Celtis laevigata*. Los valores de fuerza de tensión son comparables con los valores reportados por otros autores como Bischetti *et al.* (2005); De Baets *et al.* (2008); Sánchez *et al.* (2017b) dentro de los diámetros probados para las especies arbóreas.

Para todas las especies estudiadas, se evidencia una disminución en la fuerza de tensión de las raíces a medida que aumenta su diámetro. La naturaleza de esta relación fuerza-diámetro varía según la especie considerada. Para *Cercis canadensis*, *Celtis laevigata* y *Quercus rysophylla*, la fuerza de tensión dentro de una especie varía según el diámetro de la raíz. Sin embargo, para *Ligustrum lucidum* la relación (coeficiente de correlación) es algo pobre, los valores no difieren marcadamente a través del diámetro. Este comportamiento específico para *L. lucidum* está en concordancia con lo informado por Sánchez (2015) donde atribuyen este comportamiento a las características del sitio.

5. Conclusiones

Los cambios en las propiedades mecánicas fuerza máxima de quiebre ($F_{\max}$) y módulo de elasticidad (E_{root}) están influenciados por el diámetro de la raíz y no por la especie. El orden de importancia de especies por su fuerza de tensión es el siguiente: *Celtis leavigata* > *Quercus rysophylla* > *Cercis canadensis* > *Ligustrum lucidum*.

CAPÍTULO II. COMPOSICIÓN QUÍMICA RADICULAR DE ESPECIES NATIVAS DEL NORESTE DE MÉXICO

Resumen

El empleo de especies vegetales para la estabilización de suelos en pendientes susceptibles a deslizamientos constituye una estrategia ampliamente utilizada. La efectividad de esta práctica depende en gran medida de la arquitectura del sistema radicular, el grosor de las raíces y su composición química. Con el objetivo de comprobar que la proporción de compuestos estructurales en las raíces (lignina, hemicelulosa y celulosa) varía según su diámetro, y que la morfología del sistema radicular influye diferencialmente en la estabilización del suelo entre distintas especies, se evaluaron cinco especies nativas: *Broussonetia papyrifera*, *Decatropis bicolor*, *Dalea hospes*, *Erythrostemon mexicana* y *Zanthoxylum fagara*.

Se llevaron a cabo dos campañas de muestreo en el ecosistema de Matorral Submontano, en laderas cercanas al Parque Ecológico Chipinque (Sierra Madre Oriental), en el noreste de México (San Pedro, Nuevo León), entre los meses de junio y noviembre de 2019. Las raíces recolectadas fueron clasificadas en tres rangos diamétricos. Antes de realizar los análisis químicos, las muestras fueron tratadas conforme al protocolo de Genet et al. (2005). La determinación de los componentes químicos se realizó siguiendo el método de Van Soest et al. (1991). Por su parte, la tipología del sistema radicular se categorizó según los modelos propuestos por Styczen y Morgan (1995).

Los resultados indicaron una disminución progresiva en los contenidos de hemicelulosa y celulosa a medida que aumentaba el diámetro de las raíces. Estos componentes estructurales presentaron mayores concentraciones en las clases diamétricas I y II. En contraste, la lignina mostró una tendencia opuesta, alcanzando sus mayores niveles en la categoría de mayor diámetro (III). El orden de relevancia de las especies en función del contenido de celulosa y su potencial aplicación para la estabilización de laderas fue el siguiente: *Dalea hospes* > *Broussonetia papyrifera* > *Erythrostemon mexicana* > *Decatropis bicolor* > *Zanthoxylum fagara*.

Con base en la integración de las características químicas del suelo y la morfología del sistema radicular observadas, se sugiere un esquema de revegetación dirigido a mejorar la estabilidad del terreno. En este diseño, *Dalea hospes* y *Decatropis bicolor* se proponen para la zona superior de la pendiente, *Zanthoxylum fagara* y *Erythrostemon mexicana* para la franja intermedia, y *Broussonetia papyrifera* para la parte inferior de la ladera.

Palabras clave: morfología radicular, lignina, celulosa, hemicelulosa, especies nativas.

Summary

The use of vegetation is a recurrent practice for fixing soil on unstable slopes. The degree of fixation will largely depend on the morphology of the plant root system, its diameter and chemical composition. In order to verify that the chemical composition of the roots (contents of lignin, hemicellulose, and cellulose) is influenced by their diameter and that the morphology of the root systems as well as their influence on soil fixation is different between species. Five native species: *Broussonetia papyrifera*, *Decatropis bicolor*, *Dalea hospes*, *Erythrostemon mexicana* y *Zanthoxylum fagara* were investigated. Two samples carried out on Sierra Madre Oriental, Submontane scrub on the slopes surrounding the Chipinque Ecological Park, northeast Mexico (San Pedro, Nuevo Leon) in the months of June to November 2019 were made. The roots of the species were classified into three diameter categories. Prior to the chemical analysis, the root treatment was followed based on the methodology proposed by Genet *et al.* (2005). To determine the chemical composition, roots samples were analyzed according to the technique documented by Van Soest *et al.* (1991). Root morphology was classified according to the models proposed by Styczen and Morgan (1995). A negative relationship was found to exist between the contents, hemicellulose and cellulose as the root diameter increases. For all species, these contents were in higher proportions in diameter categories I and II. Lignin content showed an inversely proportional relationship to these contents; the highest proportions were found in category III. The ranking of species according to cellulose content and their prospective application in slope stabilization was as follows: *Dalea hospes* > *Broussonetia papyrifera* > *Erythrostemon mexicana* > *Decatropis bicolor* > *Zanthoxylum fagara*. Drawing on the root system's chemical composition and morphological traits, a revegetation strategy for soil stabilization is proposed, placing *Dalea hospes* and *Decatropis bicolor* at the upper slope, *Zanthoxylum fagara* and *Erythrostemon mexicana* in the mid-slope zone, and *Broussonetia papyrifera* at the lower slope or toe of the hillside.

Keywords: root morphology, lignin, cellulose, hemicellulose, native species.

1. Introducción

En la actualidad, la creciente frecuencia de eventos asociados al cambio climático ha incrementado la incidencia de fenómenos naturales extremos. Ante este panorama, resulta fundamental promover la investigación continua y su aplicación mediante estrategias costo-eficientes que contribuyan a la reducción del riesgo asociado a procesos de inestabilidad del terreno, como los movimientos en masa. En este contexto, el empleo de la vegetación como mecanismo natural para incrementar la cohesión del suelo ha emergido como una alternativa prometedora en la gestión del riesgo por deslizamientos en zonas de pendiente (Danjon *et al.*, 2008). No obstante, si bien las condiciones climáticas intensifican dichos procesos, Guerrero *et al.* (2016) subrayan que estos efectos se ven considerablemente agravados en regiones donde el desarrollo urbano se ha llevado a cabo sin una adecuada planificación, particularmente en laderas con fuerte pendiente.

La zona metropolitana de Monterrey, ubicada en el noreste de México, ha experimentado un notable crecimiento tanto urbano como poblacional, y actualmente continúa ampliándose con la creación de nuevos fraccionamientos en las pendientes de la Sierra Madre Oriental. Esta expansión contempla la edificación de caminos curvos que atraviesan altitudes que oscilan entre los 550 y 1350 metros sobre el nivel del mar, lo cual incrementa significativamente la exposición a fenómenos naturales y deslizamientos de tierra (Guerrero *et al.*, 2016). Las condiciones climáticas extremas intensifican esta vulnerabilidad. Durante la época de lluvias, predominan las altas temperaturas, lo que provoca una disminución de la vegetación que protege el suelo. Con el inicio de las precipitaciones, se produce un deterioro físico y estructural del terreno debido al impacto directo de la lluvia sobre superficies sin cobertura. Además, el ascenso del nivel freático y la saturación del suelo generan inestabilidad en los taludes, favoreciendo la erosión y el desplazamiento de sedimentos (Alvarado *et al.*, 2013).

Los compuestos químicos presentes en el sistema radicular desempeñan un rol fundamental en la resistencia mecánica de las raíces frente a fallos estructurales. Genet *et al.* (2010) identificaron a la celulosa como uno de los principales determinantes en la variabilidad de la fuerza de tensión de las raíces. Un elevado contenido de este polisacárido favorece la capacidad de anclaje de la planta al sustrato, contribuyendo así a la prevención de deslizamientos (Saifuddin *et al.*, 2015). La biomasa radicular está conformada predominantemente por componentes celulósicos —como la holocelulosa y la α -celulosa—, lignina y sustancias extractables. Además, la lignina puede influir significativamente en las propiedades mecánicas de las raíces, especialmente bajo condiciones de alta humedad (Genet *et al.*, 2005). Tanto la celulosa como la lignina constituyen los principales biopolímeros estructurales que proporcionan rigidez y soporte a los tejidos vegetales (Valenciaga *et al.*, 2004).

Las raíces con diámetros pequeñas muestran una mayor fuerza de tensión por unidad de área en comparación con las raíces de diámetros grandes y las diferencias en la composición química de las raíces pueden explicar este fenómeno (Zhang *et al.*, 2014). Se ha reconocido que las raíces pequeñas proporcionan mejor cohesión al suelo y este fenómeno se ha atribuido a diferencias en la estructura de la raíz, raíces más pequeñas poseen más celulosa por masa seca que raíces con diámetros grandes (Turmanina, 1965; Hathaway y Penny, 1975; Commandeur y Pyles, 1991; Genet *et al.*, 2005).

La estructura de celulosa es óptima para resistir fallas en tensión (Sjostrom, 1993; Genet *et al.*, 2005) debido a su fuerte disposición estructural que consiste en cadenas de polímeros formadas por unidades de glucosa unidas por enlaces de hidrógeno (Delmer y Amor, 1995; Genet *et al.*, 2005) y es el polisacárido más abundante en las células vegetales (Zhang *et al.*, 2014). A diferencia de la celulosa, la hemicelulosa, que presenta una estructura amorfa aleatoria, tiene una resistencia pequeña (Zhang *et al.*, 2014). La lignina, la composición química más abundante en las paredes celulares (excepto la celulosa), se une a los polisacáridos de la pared celular mediante interacciones covalentes y no covalentes para formar un complejo lignina-polisacárido

que proporciona la integridad estructural de las paredes celulares (Tiimonen, 2007; Zhang *et al.*, 2014).

La comprensión profunda de los procesos involucrados permite la implementación de estrategias eficaces orientadas a la restauración ecológica y a la adopción de prácticas sostenibles para la conservación del suelo. En este contexto, el sistema radicular de las especies vegetales desempeña un papel crucial en la estabilización de suelos en pendientes, posicionándose como una alternativa biotecnológica viable dentro de las soluciones de ingeniería civil frente a fenómenos como la erosión y los deslizamientos de tierra (Stokes *et al.*, 2014). En este marco, el propósito de la presente investigación fue analizar la composición química y realizar una caracterización morfológica del sistema radicular de cinco especies nativas que se encuentran en zonas de ladera de la Sierra Madre Oriental, noreste de México, con el fin de evaluar su contribución al anclaje, fijación y estabilización del suelo.

2. Materiales y métodos

2.1 Área de estudio

El área de estudio se ubica en las cercanías del Parque Ecológico Chipinque, que forma parte del Área Natural Protegida del Parque Nacional Cumbres de Monterrey (coordenadas 25° 33' a 25° 35' N, 100° 18' a 100° 24' O), dentro del municipio de San Pedro Garza García, en Nuevo León, México. La altitud del sitio varía aproximadamente entre 750 y 3,000 metros sobre el nivel del mar (Alanís et al., 2010). Conforme a la clasificación climática propuesta por García (2004), la región presenta un clima semiseco y semicálido con un patrón de precipitaciones mayormente en la temporada de verano (BS1hw), temperatura media anual de 21.3 °C y una precipitación anual que oscila entre 300 y 500 mm. En términos de propiedades edáficas, predominan suelos litosoles y regosoles calcáreos, junto con rendzinas, luvisoles y xerosoles, caracterizados principalmente por texturas medias (García, 2013).

2.2 Selección de especies

Se obtuvieron muestras de raíces de cinco especies arbustivas nativas propias de la Sierra Madre Oriental, representativas del matorral submontano. La elección de estas especies se fundamentó en su prevalencia y distribución dentro del área de estudio, así como en su presencia en terrenos con pendientes pronunciadas (Sánchez *et al.*, 2017; Zavala *et al.*, 2019). Las raíces fueron clasificadas en rangos diamétricos comprendidos entre 0.10 y 10 mm, agrupándose en categorías de diámetro pequeño, mediano y grande, siguiendo el protocolo establecido por Zavala et al. (2019). Asimismo, se incluyó un análisis detallado de la arquitectura del sistema radicular para su caracterización morfológica, utilizando la clasificación tipológica propuesta por Styczen y Morgan (1995). Además, se registraron variables relacionadas con el contenido de humedad de las raíces y la altitud del sitio de muestreo para cada especie estudiada.

2.3 Descripción de las especies investigadas

Broussonetia papyrifera (L.) Vent. Árbol de hasta 15 m de altura con corteza tostada, lisa o moderadamente fruncida. Ramas marrones, pubescentes. Brote terminal ausente, brotes axilares de color marrón oscuro, pubescentes cortos; cicatrices foliares casi circulares, algo elevadas. Hojas estípulas ovadas a ovadas oblongas, ápice atenuado, márgenes serrados. Inflorescencias estaminadas 6-8 cm; pedúnculo 2-4 cm, sépalos pubescentes. Fruto en drupa rojas o anaranjada, oblanceolada. Floración en primavera (Flora of North America, 1993).

Erythrostemon mexicana A. Gray. Arbusto o árbol que alcanza entre 1.5 y 6 metros de altura, con ramas desprovistas de espinas. Presenta hojas compuestas, bipinnadas y alternas, con entre 5 y 9 pinnas por hoja, de aproximadamente 5 a 7 cm de longitud. Cada pinna posee de 4 a 5 pares de folíolos. Las flores son de color amarillo, con cinco pétalos libres que miden entre 0.9 y 1.2 cm de largo. Las inflorescencias están organizadas en racimos terminales compuestos por 10 a 30 flores, cuyos pedicelos articulados cerca del ápice miden entre 1 y 2.2 cm. El fruto es una vaina oblonga, curvada, aplanada, dehiscente, de color café claro, que mide de 4 a 7 cm de largo. Contiene semillas lenticulares, aplanadas y brillantes. La floración ocurre entre los meses de febrero y julio. (Alanís *et al.*, 1995).

Dales hospes (Rose) Bullok. Arbusto de 1-2 m de altura, ramas delgadas, endebles, curvadas o rectas; hojas alternas, pinnado compuestas, 1-2.1 cm de largo, glabras, pecíolo 2-3 mm de largo, folíolos obovados, 2-4 mm de largo, glabros, con glándulas en el envés; inflorescencias dispuestas en racimos espigados, terminales, opuestos a las hojas; corola amarilla, formada por 5 pétalos, estandarte ancho ovado a deltado; fruto una vaina pequeño, inmersa dentro del cáliz, papiráceo, hialino, pubescente en la porción media superior (Estrada, 1989).

Decatropis bicolor (Zucc.) Radlk. Arbusto o árbol de 2-7 m de altura, ramificado desde la base, ramas escasas, sin espinas. Hojas compuestas, pinnadas, alternas, de 7-40 cm de longitud, pubescentes, foliólos impares, lanceolados, de 2.5-10 cm de largo, gruesos, agudos. Flores blancas, pequeñas, dispuestas en grandes panículas terminales pubescentes e interrumpidas, cáliz persistente y penta-dentado. Época de floración marzo a mayo. Fruto de 2 a 5 pequeños folículos, conteniendo en su interior solamente una semilla reniforme café (Alanís *et al.*, 1995).

Zanthoxylum fagara (L.) Sarg. Arbusto o árbol que puede alcanzar hasta 10 metros de altura, caracterizado por su intenso aroma. Presenta una corteza delgada y grisácea, protegida por una capa externa gruesa. Las ramas están provistas de espinas recurvadas en forma de gancho. Las hojas son compuestas, alternas o dispuestas en fascículos, con una longitud de entre 2 y 9 cm; el raquis es notablemente alado y porta entre 5 y 13 foliólos de forma ovada u obovada, de 0.7 a 2.5 cm de largo, con márgenes escasamente dentados que presentan glándulas marginales. Las flores, de tonalidad verde amarillenta, se agrupan en inflorescencias laterales más cortas que el follaje. La floración ocurre entre febrero y marzo. El fruto es un folículo seco, brillante y negro, que contiene una sola semilla. (Alanís *et al.*, 1995).

2.4 Método de muestreo de las raíces

Los individuos de cada especie fueron seleccionadas al azar. Se tomaron muestras de cinco individuos por especie para cada una de las cinco especies analizadas (Zavala *et al.*, 2019). Así mismo, se extrajo un sistema radicular representativo por especie considerando una óptima exposición en la pendiente. Las raíces fueron excavadas manualmente de una ladera expuesta en el suelo de la pendiente. Una vez retiradas las raíces individuales y los sistemas radiculares, las muestras fueron depositadas en bolsas individuales debidamente etiquetadas y conservadas temporalmente en una nevera portátil, con el fin de preservar su contenido de humedad. Posteriormente, se

trasladaron al Laboratorio de Química de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) para su análisis.

Se consideraron dos puntos para el muestreo de las cinco especies de árboles nativos para pruebas químicas en raíces de acuerdo con su distribución natural, abundancia y presencia en áreas de laderas (Sánchez *et al.*, 2017).

El muestreo de raíces de cada especie se realizó manualmente y se seleccionaron al azar 5 individuos por especie (Zavala *et al.*, 2019), donde se consideraron las siguientes especies: *Broussonetia papyrifera* (L.) Vent, *Erythrostemon mexicana* A. Gray, *Decatropis bicolor* (Zucc.) Radlk, *Decatropis bicolor* (Zucc.) Radlk y *Zanthoxylum fagara* (L.) Sarg. El muestreo se llevó a cabo en áreas expuestas de sistemas de raíces. El sistema de raíces y las propiedades morfológicas se determinaron in situ antes de la fotografía y el muestreo de raíces (Sánchez *et al.* 2017). Las muestras recolectadas fueron trasladadas a los laboratorios correspondientes.

2.5 Preparación de muestras para caracterización morfológica radicular

Con el objetivo de identificar el tipo de morfología radicular, se llevó a cabo la caracterización de cada especie mediante el análisis de imágenes y mediciones directas del sistema radicular extraído, considerando variables como el ángulo de crecimiento, la longitud de las raíces principales y la densidad general del entramado radicular.

2.6 Preparación de las muestras de raíz para su análisis químico

Después de las pruebas mecánicas de las raíces, se examinaron las propiedades químicas de las especies. En el laboratorio, las muestras de raíz se clasificaron en tres categorías diamétricas: categoría I (0.1 a 2.9 mm), categoría II (2.9 a 6.0 mm), y

categoría III (6.1 a 9.9 mm). Para este proceso, se tomó el sistema radicular completo de cada una de las especies y se procedió a seccionar cuidadosamente en raíces pequeñas, medianas y grandes (Figura 7).



Figura 7. a) Proceso de molido de material; b) Muestra de raíz molida, y c) División por categoría diamétrica.

Para la cuantificación de los componentes químicos estructurales (porcentaje de celulosa, lignina y hemicelulosa), se empleó el protocolo propuesto por Van Soest *et al.* (1991), el cual permite la separación secuencial de las fracciones constituyentes de la pared celular, específicamente aquellas integradas por celulosa y lignina, y proporciona una estimación indirecta del contenido de hemicelulosas (Segura *et al.*, 2007). Siguiendo la metodología descrita por Genet *et al.* (2010), se procedió a remover la corteza de las raíces antes del análisis. Posteriormente, cada muestra fue pulverizada utilizando un molino Thomas Scientific, modelo 4 #3375-E45, número de serie 101327 (Figura 7a). Para facilitar el proceso de molienda, las raíces fueron previamente deshidratadas en una estufa (Felisa®, modelo FE-292AD, México) a 60 °C durante un periodo de 24 horas, temperatura que no compromete la integridad de los compuestos químicos presentes en el tejido radicular. De cada muestra, se pesaron 0.5 g, los cuales fueron introducidos en bolsas filtrantes de fibra con porosidad de 25 µm, etiquetadas cuidadosamente con su número de identificación correspondiente. (Figura 8).



Figura 8. Sistema radicular de individuos de *Erythrostemon mexicana*; b) Secciones del sistema radicular de *Broussonetia papyrifera*; c) Sistema radicular de *Broussonetia papyrifera*.

2.7 Determinación de la composición química

Cuantificación de lignina. Para la determinación del contenido de lignina, se preparó una solución de ácido sulfúrico al 72 % (v/v). Las muestras fueron sumergidas en un litro de dicha solución y sometidas a agitación manual cada 30 minutos durante un periodo de 3.5 horas. Concluido este tratamiento ácido, se procedió a enjuagar las muestras con agua destilada a 90 °C hasta asegurar la completa eliminación del ácido residual. Posteriormente, las muestras fueron transferidas a acetona pura (≥ 99.5 % v/v) durante 5 minutos para eliminar compuestos solubles no deseados. Luego, se colocaron en una estufa (Felisa®, modelo FE-292AD, México) a una temperatura constante de 105 °C durante 2 horas, tras lo cual se registró el peso seco final.

Cuantificación de celulosa. El contenido de celulosa se estimó sobre base seca (%), mediante el cálculo de la pérdida de masa relativa, considerando la diferencia entre el peso inicial y el peso final de cada muestra después del tratamiento químico.

2.8 Contenido de humedad

De acuerdo con Faisal (2010), el contenido de humedad se calculó de la siguiente manera:

$$\text{Contenido de humedad (\%)} = \frac{\text{Peso fresco de la raíz} - \text{Peso seco de la raíz}}{\text{Peso seco de la raíz}} * 100$$

2.9 Análisis estadísticos

Con el objetivo de evaluar los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas, se aplicaron pruebas de normalidad de Kolmogorov-Smirnov a las variables lignina, celulosa y hemicelulosa. De las tres, únicamente la variable correspondiente a celulosa cumplió con los supuestos establecidos. Para esta variable, se utilizó un análisis de varianza bifactorial (ANOVA de dos vías) con el fin de examinar diferencias significativas en el contenido de celulosa entre especies (Factor A), clases diamétricas (Factor B), así como la posible interacción entre ambos factores (A×B). La comparación de medias para especies y diámetros se llevó a cabo mediante la prueba de Tukey.

Dado que las variables lignina y hemicelulosa no cumplieron con los criterios de normalidad, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para evaluar diferencias entre especies y clases de diámetro. Adicionalmente, se desarrollaron modelos de regresión (logarítmica, exponencial y polinómica) con el fin de identificar patrones de relación entre las variables químicas y el diámetro radicular para cada especie. Finalmente, se empleó el coeficiente de correlación de Spearman para analizar asociaciones entre las variables. Todos los procedimientos estadísticos fueron realizados utilizando el software IBM SPSS Statistics, versión estándar 22.0 para Windows.

3 Resultados

3.1 Composición química de raíces de especies arbustivas

Se evaluaron un total de 75 muestras radiculares, distribuidas equitativamente entre las cinco especies analizadas: *Decatropis bicolor* (n = 15), *Zanthoxylum fagara* (n = 15), *Erythrostemon mexicana* (n = 15), *Broussonetia papyrifera* (n = 15) y *Dalea hospes* (n = 15). Los resultados derivados del análisis de varianza indicaron diferencias altamente significativas ($p \leq 0.01$) en el contenido de celulosa, tanto entre especies como entre clases diamétricas. Asimismo, se detectó un efecto significativo en la interacción entre especie x diámetro (Tabla 4).

Tabla 4 Resultados del análisis de varianza de acuerdo con un experimento factorial con diseño completamente aleatorio para la variable contenido de celulosa entre las diferentes especies (Factor A), diámetros (Factor B) e interacción especie × diámetro (AB).

Fuente variación	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	Valor F	Valor p
Especies (A)	4	1,399.34	349.89	27.57	<.001
Diámetro(B)	2	4,305.78	2,152.89	169.70	<.001
Interacción (A×B)	8	431.85	53.98	4.25	<.001
Error	60	761.16	12.68		
Total	74				

Las medias de contenido de celulosa entre las especies analizadas oscilaron entre 28.16 % en *Erythrostemon mexicana* y 40.70 % en *Dalea hospes* (Figura 9). De acuerdo con los resultados de la prueba de comparaciones múltiples de Tukey ($p = 0.05$), *Decatropis bicolor* y *Zanthoxylum fagara* no presentaron diferencias

significativas entre sí, conformando un mismo grupo estadístico, al igual que *Erythrostemon mexicana* y *Broussonetia papyrifera*, cuyos valores también se consideran equivalentes desde el punto de vista estadístico. En contraste, *Dalea hospes* mostró un contenido medio de celulosa significativamente superior al del resto de las especies evaluadas, situándose en un grupo estadísticamente distinto.

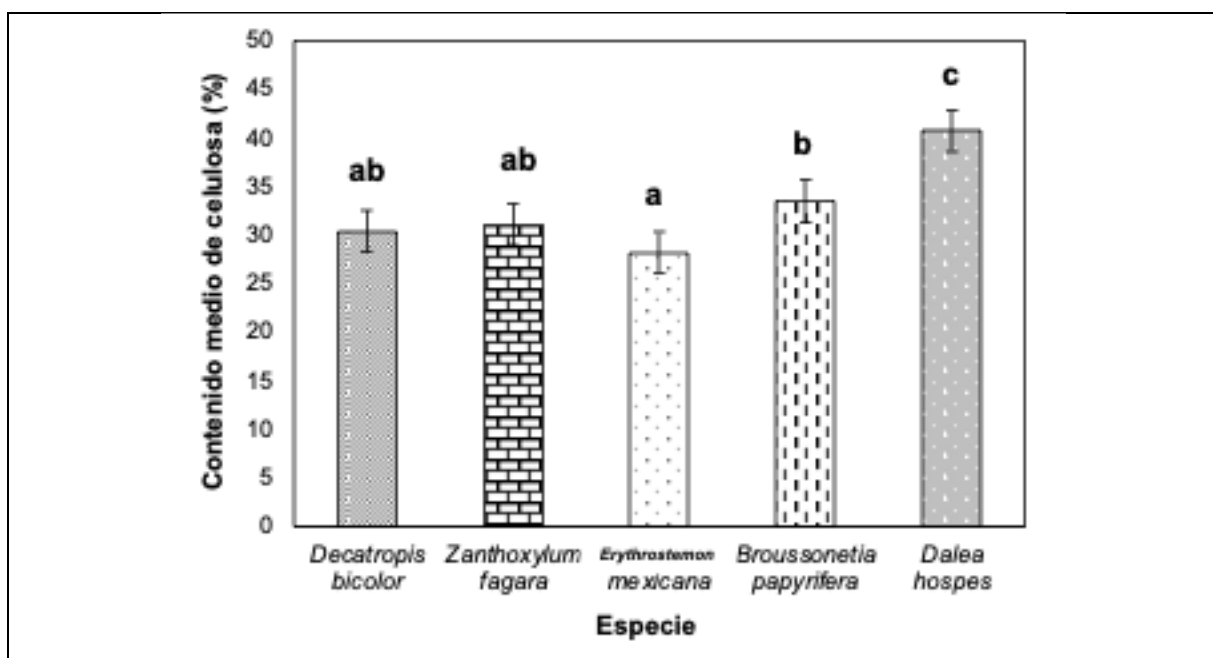


Figura 9. Valores medios del contenido de celulosa en cinco especies nativas. Medias con letras diferentes indican diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey ($p=0.05$).

Los promedios de contenido de celulosa obtenidos para las distintas clases de diámetro fueron de 23.97 % en la categoría III (6.1 a 9.9 mm), 31.78 % en la categoría II (2.9 a 6.0 mm) y 42.46 % en la categoría I (0.1 a 2.9 mm), siendo esta última la que presentó las concentraciones más elevadas. El análisis estadístico mediante la prueba de comparaciones múltiples de Tukey ($p = 0.05$) indicó que existen diferencias significativas entre las tres categorías diamétricas evaluadas. (Figura 10).

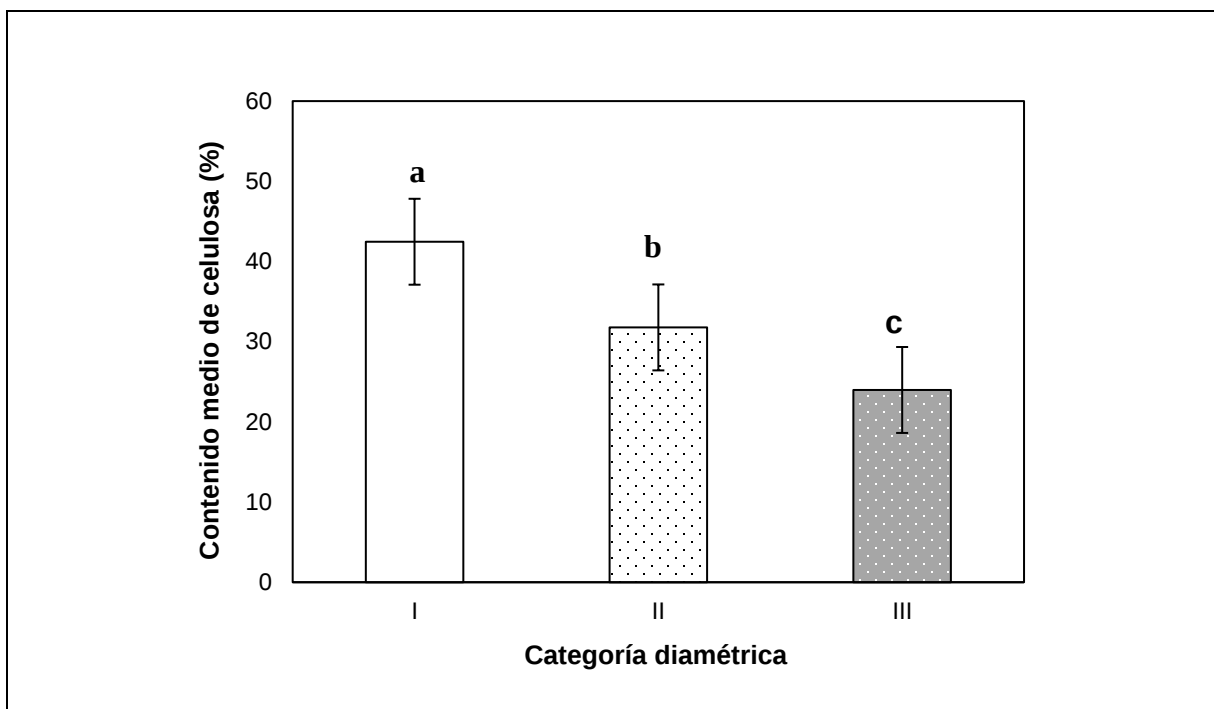


Figura 10. Valores medios del contenido de celulosa para tres categorías diamétricas, categoría III (6.1 a 9.9 mm), categoría II (2.9 a 6.0 mm) y categoría I (0.1 a 2.9 mm). Medias con letras diferentes indican diferencias estadísticas ($p=0.05$) de acuerdo con la prueba de Tukey.

Según los resultados obtenidos a través de la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, se observaron diferencias altamente significativas en el contenido de hemicelulosa entre las distintas especies analizadas. En contraste, los niveles de lignina no mostraron variaciones estadísticamente significativas entre especies. Con respecto al factor diámetro radicular, se identificaron diferencias altamente significativas ($p \leq 0.01$) tanto en el contenido de lignina como en el de hemicelulosa. (Tabla 5).

Tabla 5. Prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias en los contenidos de lignina y hemicelulosa entre especies y diámetros de la raíz.

Fuente	Estadístico	Lignina	Hemicelulosa
Especies	χ^2	9.072	14.585
	gl	4	4
	valor p	.059 ^{NS}	.006 ^{**}
Diámetro	χ^2	53.137	52.107
	gl	2	2
	valor p	<.001 ^{**}	<.001 ^{**}

*($p \leq .05$) diferencias significativas; **($p \leq .01$) diferencias altamente significativas; ^{NS}($p > .05$) diferencias no significativas.

3.2 Modelos de regresión para lignina, hemicelulosa y celulosa

Se identificó una relación positiva entre el contenido de lignina y el diámetro radicular, observándose un incremento progresivo en la concentración de lignina conforme aumentaba el grosor de la raíz. Esta tendencia fue consistente entre todas las especies estudiadas. En particular, *Decatropis bicolor* registró los valores más elevados de lignina (27.73 %) dentro de la clase diamétrica III (diámetros de 6.1 a 9.9 mm). En contraste, los contenidos más bajos se localizaron en la clase diamétrica I (0.1 a 2.9 mm). Los análisis de regresión simple mostraron distintos tipos de ajuste según la especie: *Decatropis bicolor* presentó un ajuste exponencial ($R^2 = 0.9437$), *Zanthoxylum fagara* se ajustó a un modelo logarítmico ($R^2 = 0.8467$), mientras que *Erythrostemon mexicana* y *Broussonetia papyrifera* mostraron un mejor ajuste a modelos polinómicos ($R^2 = 0.8778$ y $R^2 = 0.9524$, respectivamente). Por su parte, *Dalea hospes* también se ajustó a un modelo exponencial ($R^2 = 0.8941$). En todos los casos, el diámetro radicular explicó de manera significativa la variación en el contenido de lignina, como se refleja en los coeficientes de determinación obtenidos (Figura 11).

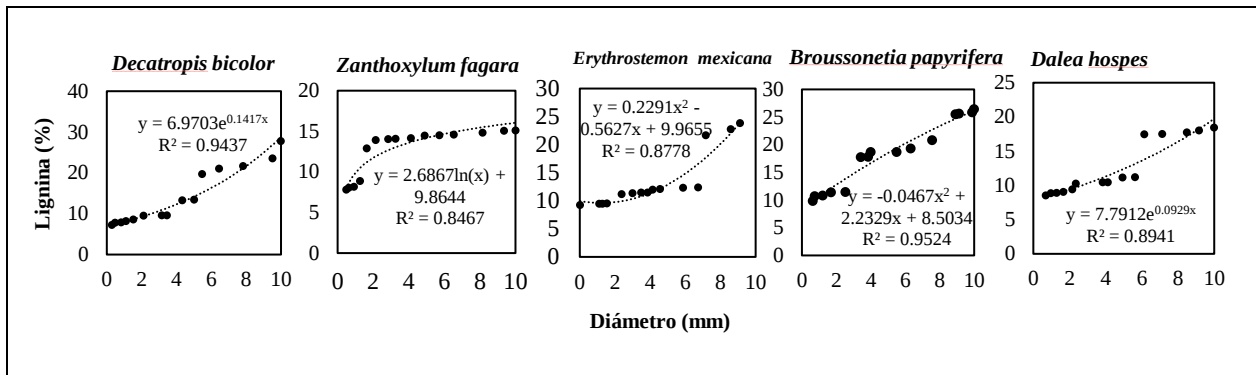


Figura 11. Modelos de regresión para la relación del contenido de lignina como función del diámetro de raíces en diferentes especies, n=25.

Por otra parte, se identificó una relación inversa entre el contenido de hemicelulosa y el diámetro de las raíces, evidenciando una disminución en su concentración a medida que aumentaba el grosor radicular. *Erythrostemon mexicana* presentó los valores más elevados de hemicelulosa (59.65 %) dentro de la clase diamétrica I (0.1 a 2.9 mm). Los modelos de regresión aplicados indicaron diferentes patrones de ajuste según la especie: *Decatropis bicolor* mostró una fuerte correlación con un modelo logarítmico ($R^2 = 0.9853$), *Zanthoxylum fagara* se ajustó a un modelo exponencial ($R^2 = 0.8920$), mientras que *Erythrostemon mexicana* y *Broussonetia papyrifera* presentaron un ajuste polinómico ($R^2 = 0.7194$ y $R^2 = 0.9062$, respectivamente). Finalmente, *Dalea hospes* también exhibió un patrón exponencial ($R^2 = 0.9041$). Con base en los coeficientes de determinación, se infiere que el diámetro radicular es un factor explicativo relevante en la variación del contenido de hemicelulosa entre especies. (Figura 12).

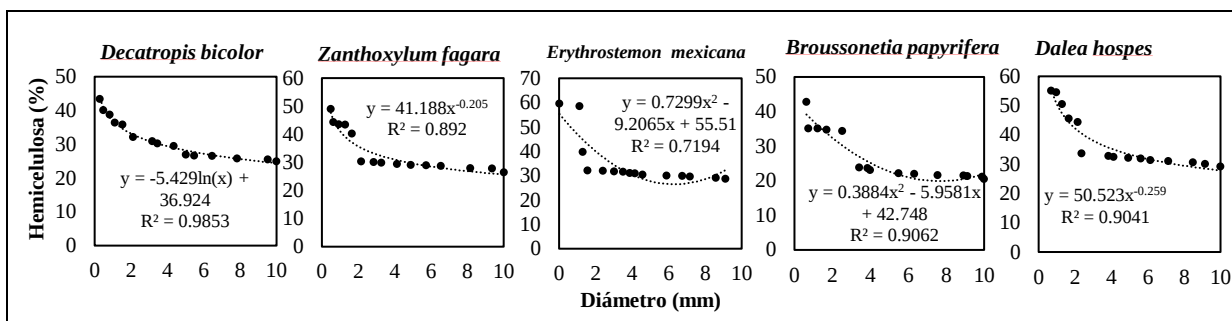


Figura 12. Modelos de regresión entre la hemicelulosa y el diámetro de las raíces en diferentes especies, n=25.

En todas las especies evaluadas, se observaron los valores más elevados de contenido de celulosa en las clases diamétricas I (0.1 a 2.9 mm) y II (2.9 a 6.0 mm). Las funciones de regresión ajustadas individualmente para cada especie reflejaron patrones congruentes con esta tendencia. En el caso de *Decatropis bicolor* y *Zanthoxylum fagara*, los datos se ajustaron a modelos polinómicos, con coeficientes de determinación de $R^2 = 0.9620$ y $R^2 = 0.9342$, respectivamente. Por su parte, *Erythrostemon mexicana* presentó un modelo de ajuste exponencial con un $R^2 = 0.7361$, mientras que *Broussonetia papyrifera* y *Dalea hospes* mostraron un comportamiento logarítmico, con $R^2 = 0.925$ y $R^2 = 0.9546$, respectivamente (Figura 13). Exceptuando a *Erythrostemon mexicana*, el diámetro radicular explicó más del 90 % de la variabilidad en el contenido de celulosa en las especies analizadas.

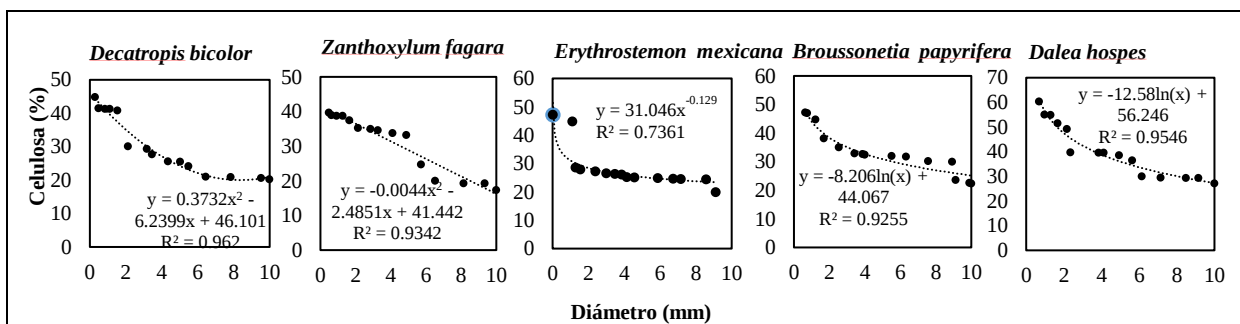


Figura 13. Modelos de regresión entre el contenido de celulosa y el diámetro de las raíces en diferentes, n =25.

3.3 Contenido de humedad en las raíces

Al analizar el contenido de humedad presente en raíces para todas las especies evaluadas, se observó un incremento en los porcentajes correspondientes a la clase diamétrica III (6.1 a 9.9 mm). *Decatropis bicolor* registró los valores más bajos de humedad, mientras que *Erythrostemon mexicana* presentó los niveles más elevados. Los promedios de contenido de humedad (%), por clase diamétrica y especie, fueron los siguientes: *Decatropis bicolor*: I (5.48), II (6.61), III (6.82); *Zanthoxylum fagara*: I (6.71), II (6.80), III (12.13); *Erythrostemon mexicana*: I (6.25), II (7.52), III (14.66); *Broussonetia papyrifera*: I (7.38), II (7.93), III (8.50); y *Dalea hospes*: I (5.91), II (5.90), III (7.37). Estos resultados sugieren una tendencia general al aumento del contenido de humedad en raíces de mayor diámetro, con variaciones interespecíficas marcadas. (Figura 14).

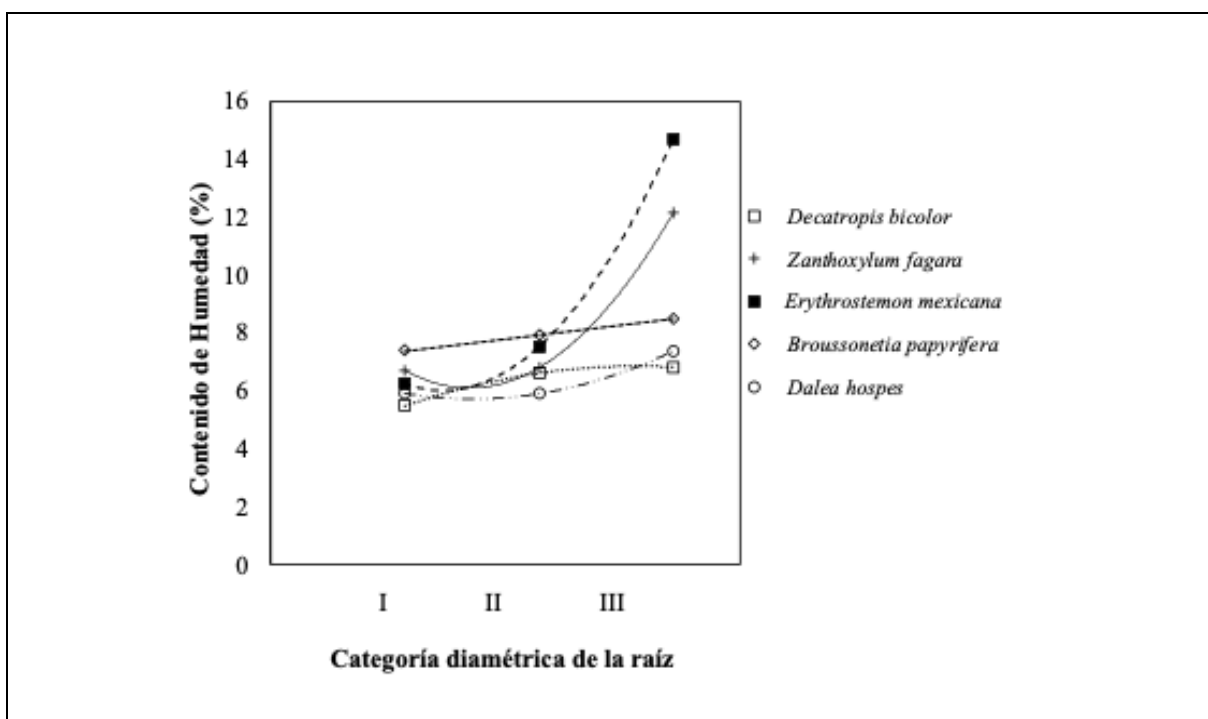


Figura 14. Asociación entre el contenido de humedad en raíces y la clasificación por rangos de diámetro en cinco especies vegetales, considerando tres clases diamétricas: clase III (6.1 a 9.9 mm), clase II (2.9 a 6.0 mm) y clase I (0.1 a 2.9 mm).

3.4 Correlaciones entre las variables

Las correlaciones de Spearman entre las variables lignina, hemicelulosa y celulosa se muestran en la Tabla 6. Se observó una asociación negativa y altamente significativa entre el contenido de lignina y las proporciones de hemicelulosa y celulosa. Por otro lado, la hemicelulosa presentó una correlación positiva y estadísticamente significativa con la celulosa, indicando una relación directa entre ambos compuestos estructurales.

Tabla 6. Correlaciones de Spearman para las variables lignina, hemicelulosa y celulosa.

Variable	Lignina	Hemicelulosa	Celulosa
Lignina	1		
Hemicelulosa	-.906**	1	
Celulosa	-.736**	.769**	1

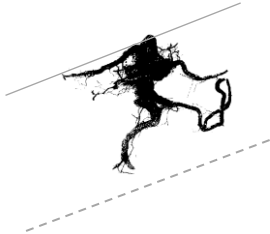
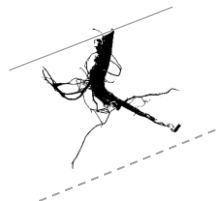
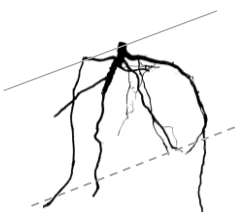
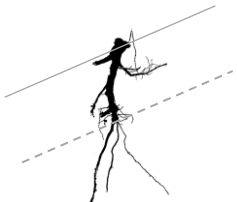
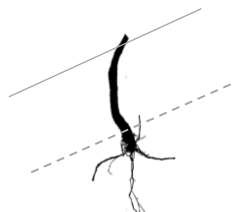
**Correlación altamente significativa ($p < .01$).

3.5 Morfología de las raíces

Con el propósito de comprender de manera más precisa los mecanismos implicados en la estabilización del suelo, se llevó a cabo un análisis morfológico de raíces, clasificadas en tres tipos funcionales según su arquitectura subterránea. La tipología radicular se determinó conforme a la metodología propuesta por Styczen y Morgan (1995). En la Tabla 7, dentro de la columna correspondiente a morfología, la línea continua representa la superficie del suelo, mientras que la línea segmentada indica la profundidad máxima alcanzada por el desarrollo radicular.

Decatropis bicolor (clasificada como Tipo M) presentó una profundidad de 29 cm; *Zanthoxylum fagara* (Tipo VH), 36 cm; *Erythrostemon mexicana* (Tipo VH), 58 cm; *Broussonetia papyrifera* (Tipo H), 45 cm; y *Dalea hospes* (Tipo M), 19 cm.

Tabla 7. Caracterización detallada de la arquitectura radicular de cada una de las especies evaluadas, empleando el enfoque metodológico propuesto por Styczen y Morgan (1995).

	Especie	Familia	Tipo de raíz	Morfología
Tipo M Desarrollo máximo de la raíz en los primeros 30 cm. Extensión lateral estrecha. 	<i>Decatropis bicolor</i>	Rutaceae	M	
	<i>Dalea hospes</i>	Fabaceae	M	
	<i>Broussonetia papyrifera</i>	Moraceae	H	
	<i>Zanthoxylum fagara</i>	Rutaceae	VH	
	<i>Erythrostemon mexicana</i>	Fabaceae	VH	
Tipo H Desarrollo de raíz en los primeros 60 cm. Extensión lateral amplia. 				
Tipo VH Raíz primaria pivotante fuerte y profunda. 				

3.6 Patrón de distribución espacial de especies vegetales nativas a lo largo de una pendiente.

Con base en los resultados obtenidos sobre la composición química y las características morfológicas del sistema radicular de las cinco especies nativas analizadas, se desarrolló una propuesta de diseño para un sistema de revegetación orientado a la estabilización del suelo en una ladera representativa de la Sierra Madre Oriental, localizada en el noreste de México. (Figura 15).

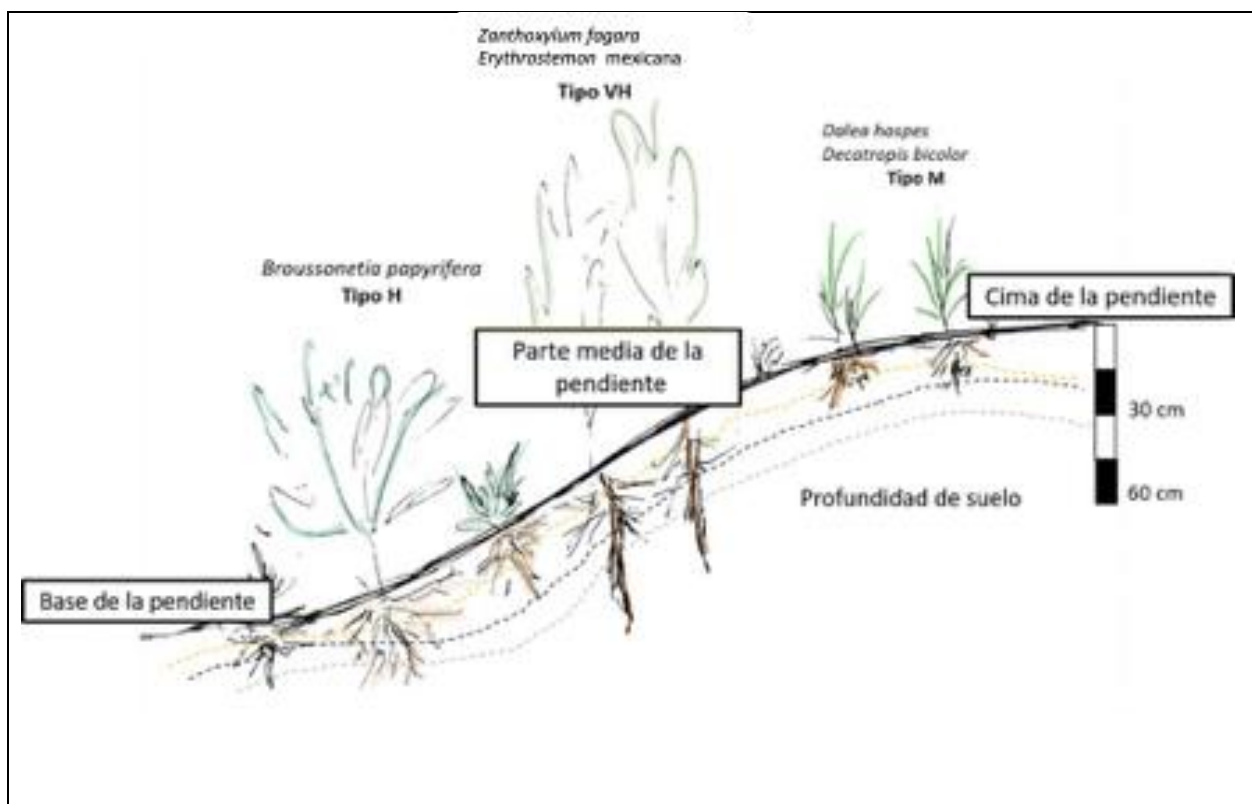


Figura 15. Esquema representativo de un sistema de revegetación utilizando especies vegetales nativas, considerando tanto las características del sistema radicular como su composición química, con el objetivo de promover la estabilización del suelo en una ladera característica de la Sierra Madre Oriental.

4. Discusión

Los resultados indicaron que en el intervalo de diámetro comprendido entre 0.1 y 2.9 mm (clasificado como categoría diamétrica I), se registraron los porcentajes más elevados de celulosa. En todas las especies evaluadas, se evidenció un patrón consistente de relación inversa entre el contenido de celulosa y el diámetro radicular, observándose un incremento progresivo en los niveles de celulosa en raíces de menor calibre. De acuerdo con Genet *et al.* (2005) y Hales *et al.* (2009), las raíces de diámetros reducidos presentan una alta resistencia a esfuerzos tensionales. A partir de esta premisa, Genet *et al.* (2005) postulan que este grupo diamétrico posee una mayor capacidad de resistencia mecánica debido a su elevada concentración de celulosa. Dado que la fuerza de tensión en las raíces está estrechamente vinculada con su composición química, en con el contenido de polisacáridos estructurales como la celulosa, se espera que las raíces de la categoría diamétrica I, especialmente en *Dalea hospes* (60.34 %) y *Broussonetia papyrifera* (47.16 %), contribuyan de manera significativa a la estabilización del suelo en entornos con pendiente.

Los patrones de contenido observados en esta investigación fueron consistentes con los reportados por Genet *et al.* (2006), pero difieren de los hallazgos de Thomas *et al.* (2014), quienes señalaron que las raíces finas presentan bajos niveles de celulosa y, en contraste, altos valores de lignina. Esta discrepancia en los resultados puede atribuirse, en parte, a las diferencias metodológicas empleadas. En su estudio, Thomas *et al.* (2014) utilizaron una versión modificada del protocolo propuesto por Brendel *et al.* (2000) para la cuantificación de celulosa, el cual produce una forma purificada del compuesto, así como el método basado en Bromuro de Acetilo (AB) para la determinación del contenido de lignina. Además, no se reportó la remoción de la corteza en las muestras radiculares analizadas, y es probable que hayan empleado una categorización diamétrica distinta.

En contraste, el presente estudio aplicó el método propuesto por Van Soest (1991) para la determinación de fracciones químicas de la pared celular, y la corteza fue retirada de todas las muestras siguiendo la metodología de Genet et al. (2005), lo cual podría explicar las diferencias observadas en los resultados. Si bien aún no se ha explorado exhaustivamente el impacto que la presencia o ausencia de corteza radicular puede tener sobre la composición química de las muestras, algunos estudios han comenzado a señalar posibles implicaciones. Por ejemplo, Yang *et al.* (2016) reportaron que las raíces desprovistas de corteza presentaron proporciones significativamente más altas de lignina y celulosa en comparación con aquellas que conservaban esta estructura externa. Este hallazgo sugiere que la corteza podría desempeñar un papel modulador en la acumulación o distribución de componentes químicos, lo que resalta la necesidad de considerar esta variable en futuros análisis fisicoquímicos de raíces.

El patrón de comportamiento observado para la lignina fue inverso al registrado para la celulosa. Mientras que los porcentajes de celulosa fueron más elevados en raíces de pequeño diámetro (0.1 a 2.9 mm), el contenido de lignina mostró un incremento progresivo conforme aumentaba el grosor radicular. Tradicionalmente, la capacidad de fijación del suelo por parte del sistema radicular ha sido principalmente asociada con la proporción de celulosa, más que con la lignina. No obstante, Klauditz *et al.* (1947) reportaron que la lignina también puede contribuir a la estabilización del suelo, particularmente bajo condiciones de alta humedad. En el presente estudio, se identificó una correlación positiva entre el contenido de lignina y los niveles de humedad radicular en todas las especies evaluadas. En este sentido, *Zanthoxylum fagara* y *Erythrostemon mexicana* destacaron por presentar altos porcentajes de humedad en raíces de la categoría diamétrica III (6.1 a 9.9 mm), lo que se asoció con una mayor proporción de tejido lignificado en sus paredes celulares. *Erythrostemon mexicana* registró el mayor contenido de humedad con un valor de 14.66 %, seguida por *Z. fagara* con 12.13 %. Por otro lado, *Decatropis bicolor* y *Broussonetia papyrifera* presentaron una distribución más uniforme del contenido de humedad entre las tres clases diamétricas.

En *D. bicolor*, los valores oscilaron entre 5.48 % (categoría I) y 6.82 % (categoría III), mientras que en *B. papyrifera* los rangos fueron de 7.38 % a 8.50 %, respectivamente. Es importante señalar que estas dos especies también mostraron los mayores contenidos de lignina. En general, se identificó una tendencia común entre las especies estudiadas: los niveles de humedad en la raíz se incrementaron en la categoría diamétrica III, y fue en esta misma clase donde se registraron los mayores porcentajes de lignina.

En el presente estudio, se observó que los individuos recolectados a mayores altitudes presentaron, en promedio, proporciones más elevadas de lignina en sus raíces. Esta tendencia fue particularmente evidente en *Broussonetia papyrifera* y *Decatropis bicolor*, las cuales registraron los contenidos más altos de lignina, con valores de 26.41 % y 27.73 %, respectivamente. Ambas especies fueron muestreadas en los sitios de mayor elevación dentro del área de estudio, a 3,296 y 3,304 metros sobre el nivel del mar. En contraste, el resto de las especies se distribuyeron en altitudes inferiores, dentro de un rango aproximado de 2,000 msnm, donde se observó una reducción en el contenido de lignina. Esta disminución fue particularmente evidente en *Zanthoxylum fagara*, que a una altitud de 2,621 msnm presentó un contenido de lignina de apenas 15.08 %. Estos hallazgos concuerdan con estudios previos que han demostrado que la altitud puede ejercer un efecto significativo sobre los procesos de lignificación en tejidos vegetales.

Gindl *et al.* (2001) señalaron que los árboles establecidos en altitudes elevadas tienden a un incremento en la concentración de lignina. En su estudio, detectaron un aumento progresivo en el contenido de lignina en la madera de *Picea abies* (abeto de Noruega) conforme se incrementaba la altitud. De manera complementaria, Scippa *et al.* (2006) reportaron que las especies vegetales que se desarrollan en zonas de pendiente presentan niveles significativamente más altos de lignina en comparación con aquellas que crecen en terrenos llanos. Este incremento en la biosíntesis de lignina ha sido vinculado con la respuesta adaptativa de las plantas al estrés mecánico inducido por

factores como la inclinación del terreno o la exposición a condiciones ambientales adversas (Scippa *et al.*, 2006).

La hemicelulosa, por su parte, mostró un comportamiento comparable al de la celulosa. Esta similitud se debe principalmente a que las hemicelulosas son polisacáridos que se encuentran estructuralmente asociados a las fibras de celulosa en las paredes celulares. En consecuencia, las cantidades cuantificadas al finalizar el análisis reflejan de forma conjunta la presencia de ambos compuestos. Los niveles de celulosa y hemicelulosa tendieron a incrementarse conforme disminuyó el diámetro de las raíces, siendo más abundantes en raíces delgadas y de menor calibre (Genet *et al.*, 2010). Referente al diámetro, se ha mencionado que las raíces de diámetros finos, por sus contenidos altos de celulosa proveen una óptima fijación al suelo.

La capacidad de las raíces para contribuir a la estabilización del suelo está determinada no solo por sus propiedades individuales ni por la interacción específica entre el suelo y la raíz, sino también por la configuración integral del sistema radicular (Reubens *et al.*, 2007). Cada especie vegetal desarrolla un patrón distintivo de enraizamiento, influenciado por las condiciones edáficas y ambientales del sitio de crecimiento. Aunque la arquitectura radicular constituye uno de los factores más relevantes en la provisión de anclaje mecánico y fijación al sustrato (Dupuy *et al.*, 2005), dicha morfología puede ser modificada por las características del suelo. En consecuencia, la composición química de las raíces se encuentra estrechamente ligada al entorno local, lo cual explica las variaciones inter e intraespecíficas observadas (Genet *et al.*, 2005).

En este estudio, se evaluaron tres factores clave asociados a la fijación del suelo: la morfología, el tamaño (diámetro) y la composición química de las raíces. Dado que la resistencia a la tensión tiende a incrementarse conforme disminuye el diámetro radicular (Genet *et al.*, 2005), se infiere que sistemas con alta densidad de raíces finas ofrecen una mayor eficacia en la estabilización del suelo, en gran parte debido a su elevado contenido de celulosa. Desde una perspectiva funcional, las especies que desarrollan raíces principales profundas y verticales tienden a mejorar la fijación del

suelo en la zona media de las pendientes, al alcanzar capas más profundas del perfil edáfico (Figura 9; Stokes *et al.*, 2008). En cambio, especies con sistemas radiculares más superficiales, densos y de orientación oblicua son más eficaces en la estabilización de las zonas superior e inferior del talud (Danjon *et al.*, 2008). En este estudio, *Zanthoxylum fagara* y *Erythrostemon mexicana* desarrollaron raíces verticales con profundidades cercanas a los 60 cm, lo que las posiciona como candidatas idóneas para revegetar sectores intermedios de las laderas. Conforme a la tipología de Styczen y Morgan (1995), estas especies se clasifican como de tipo VH. Cabe señalar que la ausencia o escasa presencia de raíces laterales podría limitar su contribución total a la estabilidad del suelo.

Por su parte, *Decatropis bicolor*, *Dalea hospes* y *Broussonetia papyrifera* presentaron sistemas radiculares con profundidades máximas de hasta 45 cm y con mayor densidad de raíces concentrada en las capas superficiales del suelo. Estas características las hacen más adecuadas para la estabilización de los extremos superior e inferior de las pendientes. Según la clasificación funcional de raíces, estas especies corresponden a los tipos M y H.

La eficacia del sistema radicular en la estabilización del suelo está condicionada por diversos factores, incluyendo la especie, la edad del individuo, las condiciones ambientales locales y las características experimentales (Stokes *et al.*, 2009). No obstante, las propiedades químicas del tejido radicular, particularmente el contenido de celulosa, emergen como indicadores funcionales relevantes para evaluar su desempeño mecánico. En este sentido, los sistemas de tipo M y H podrían desempeñar un papel fundamental en el refuerzo del suelo, gracias a la elevada proporción de celulosa asociada a raíces finas.

Si bien la celulosa es crucial en la fuerza de tensión, la lignina también cumple una función estructural relevante. Este polímero contribuye a la rigidez del tejido vegetal y al funcionamiento de otros tipos celulares dentro de los órganos de la planta (Barros *et al.*, 2015). Además, su acumulación se ha asociado con mecanismos de defensa frente a factores bióticos, al limitar la invasión de fitopatógenos y restringir la

propagación de toxinas (Fortiz y Mejía, 2016). La deposición de lignina suele incrementarse bajo condiciones de estrés ambiental, tanto biótico como abiótico.

Por tanto, el potencial de cada especie para contribuir a la fijación del suelo está vinculado principalmente a la densidad de raíces finas (categoría diamétrica I: 0.1–2.9 mm) y a las características morfofuncionales de su sistema radicular. En función de estos hallazgos, se propone una estrategia de revegetación basada en una combinación de especies con raíces profundas y largas junto con aquellas de crecimiento lateral y superficial, asignadas según su ubicación óptima en la ladera: *Dalea hospes* y *Decatropis bicolor* (Tipo M) en la cima, *Zanthoxylum fagara* y *Erythrostemon mexicana* (Tipo VH) en la zona media, y *Broussonetia papyrifera* (Tipo H) en la base del talud.

5. Conclusiones

La jerarquización de las especies en función de su contenido de celulosa y su aplicabilidad en la estabilización de taludes fue la siguiente: *Dalea hospes* > *Broussonetia papyrifera* > *Erythrostemon mexicana* > *Decatropis bicolor* > *Zanthoxylum fagara*. La combinación de raíces principales (axiales) con raíces laterales (oblicuas o horizontales) favorece un anclaje más eficiente, lo cual se atribuye a la interacción entre el diámetro radicular, su composición química y la resistencia tensil que estas ejercen. Los hallazgos de esta investigación indican que una mayor capacidad de fijación del suelo está vinculada a la arquitectura radicular, el grosor de las raíces y su contenido de compuestos estructurales como la celulosa y la lignina. En términos generales, la morfología del sistema radicular constituye un factor clave para contrarrestar el desprendimiento de plantas durante eventos de deslizamientos superficiales. La eficacia de este tipo de enfoques sustentados en soluciones basadas en la naturaleza estará estrechamente vinculada a la elección acertada de las especies vegetales, así como a las características particulares del sitio en términos de propiedades del suelo, configuración topográfica y condiciones climáticas predominantes.

CAPÍTULO III. EL EFECTO MECÁNICO DE LAS RAÍCES DE ESPECIES ARBÓREAS NATIVAS SOBRE LA RESISTENCIA AL CIZALLAMIENTO DEL SUELO EN LAS LADERAS DE LA SIERRA MADRE ORIENTAL, MÉXICO

Resumen

La presencia de vegetación contribuye a la reducción de la erosión del suelo y de los deslizamientos superficiales al aumentar la resistencia al corte del suelo e influir en las propiedades geomecánicas del sustrato. En consecuencia, las estrategias de revegetación implementadas en áreas vulnerables a la erosión son consideradas medidas altamente eficaces para el control de la erosión del suelo. Las especies arbóreas ubicadas en las laderas del Cerro Chipinque, en la Sierra Madre Oriental, y evaluadas en este estudio, pertenecen a cuatro especies nativas: *Cercis canadensis*, *Celtis laevigata*, *Quercus rysophylla* y *Ligustrum lucidum*. Para investigar las propiedades mecánicas de las raíces, se recolectaron muestras individuales y se sometieron a pruebas de resistencia a la tensión utilizando una Máquina Universal de Ensayo Shimadzu (Modelo SLFL-100KN). Para evaluar la influencia de las raíces en la estabilidad del suelo, se aplicó el Modelo de Wu (Wu et al., 1979), considerando el Índice de Área Radicular (RAR, por sus siglas en inglés) y la cohesión inducida por las raíces (C_r). El RAR se estimó mediante mediciones directas en campo y técnicas indirectas de procesamiento de imágenes. El índice de área radicular varió entre especies de la siguiente manera: *C. laevigata* (0.0587%) > *C. canadensis* (0.0585%) > *L. lucidum* (0.0504%) > *Q. rysophylla* (0.0441%). En cuanto a la cohesión del suelo inducida por las raíces, *L. lucidum* mostró el menor aumento en la resistencia al corte (16.12 kN/m²), seguido de *C. canadensis* (53.70 kN/m²), *Q. rysophylla* (89.07 kN/m²) y *C. laevigata*, que proporcionó el mayor incremento (97.41 kN/m²).

Palabras clave: control de la erosión, relación del área de la raíz, resistencia al corte, cohesión de la raíz.

Abstract

The integration of vegetation plays a key role in mitigating soil erosion and shallow slope failures by improving the soil's shear strength and altering its geomechanical behavior. As a result, the application of plant-based solutions in erosion-prone regions is widely recognized as an efficient and sustainable erosion control approach. This study was focused on four native tree species growing on the slopes of Mount Chipinque in the Sierra Madre Oriental: *Cercis canadensis*, *Celtis laevigata*, *Quercus rysophylla*, and *Ligustrum lucidum*. To analyze the mechanical behavior of the roots, individual root samples were collected and tested for tensile resistance using a Shimadzu SLFL-100KN Universal Testing Machine. The contribution of roots to slope stabilization was evaluated using the Wu *et al.*, (1979) model, incorporating parameters such as the Root Area Ratio (RAR) and cohesion attributed to roots (Cr). RAR values were determined through a combination of *in situ* measurements and image analysis techniques. The ranking of species according to RAR was as follows: *C. laevigata* (0.0587%) > *C. canadensis* (0.0585%) > *L. lucidum* (0.0504%) > *Q. rysophylla* (0.0441%). Regarding root-derived cohesion, *L. lucidum* contributed the least to shear strength (16.12 kN/m²), while *C. canadensis* (53.70 kN/m²), *Q. rysophylla* (89.07 kN/m²), and *C. laevigata* (97.41 kN/m²) demonstrated progressively greater effects on soil reinforcement.

Keywords: erosion control, root area ratio, shear strength, root cohesion.

1. Introducción

La presencia de vegetación reduce la erosión del suelo y la rotura de pendientes poco profundas al contribuir a la resistencia al corte del suelo e influir en las condiciones geomecánicas de este medio. Las raíces pueden mejorar algunas características mecánicas del suelo, como la cohesión y la resistencia al cizallamiento, lo que se conoce como fijación al suelo (Genet *et al.*, 2006) o refuerzo radicular (Genet *et al.*, 2008). La presencia de raíces como material con fuerte tensión en suelos con tensión débil proporciona un material compuesto con mayor resistencia y mayor resistencia al cizallamiento, así una mayor resistencia al cizallamiento del suelo resulta en una mayor resistencia contra la erosión y una pendiente con mayor estabilidad (Pollen 2007; De Baets *et al.*, 2008).

La vegetación puede ser beneficiosa para estabilizar pendientes mediante el refuerzo mecánico (Coppin y Richards 1990; Gray y Sotir 1996; Norris *et al.*, 2008; Mejier *et al.*, 2017). Sin embargo, el uso de plantas para acciones de ingeniería proporciona información cuantitativa sobre la influencia del desarrollo del sistema radicular en la estabilidad del talud (Maffra *et al.*, 2019).

La densidad de las raíces y la fuerza de tensión son las principales características biotécnicas que controlan el efecto de fijación o refuerzo de las raíces (Gray y Sotir, 1996). Muchos investigadores han utilizado el índice de área de raíces (RAR) como el principal indicador de distribución y densidad de raíces (Abernethy y Rutherford, 2000; Genet *et al.*, 2008; De Baets *et al.*, 2008). Ambos parámetros mencionados anteriormente se ven afectados por muchos parámetros bióticos y factores abióticos, como las especies de plantas y la edad (Gray y Sotir, 1996; Nilaweera y Nutalaya, 1999; Schmid y Kazda, 2001; Genet *et al.*, 2008).

El objetivo de este capítulo es explicar la relación entre las propiedades mecánicas (fuerza de tensión, T_s) de raíces de especies nativas (*Celtis laevigata*, *Quercus rysophylla*, *Cercis canadensis*, *Ligustrum lucidum*) y la cohesión del suelo (C_r), tomando en cuenta el diámetro de las raíces y el radio de área de raíz RAR, respectivamente.

2. Materiales y métodos

2.1 Área de estudio

El trabajo de campo se realizó en las laderas del Parque Ecológico Chipinque, ubicado en la porción norte de la Sierra Madre Oriental (Noreste de México) (Figura 1).

2.2 Procedimientos de muestreo y raíz

Las raíces se extrajeron de los sistemas de raíces expuestos con el propósito de causar la menor perturbación en el área (Sánchez *et al.*, 2017b) y un sistema de raíces completo para procedimientos de procesamiento de imágenes. Las propiedades morfológicas de las raíces se determinaron *in situ* antes de tomar fotografías y muestrear las raíces. El muestreo se realizó a cinco profundidades: 0 a 10 cm, 10 a 20 cm, 20 a 30 cm, 30 a 40 cm y 40 a 50 cm. Las muestras recolectadas fueron trasladadas a los laboratorios correspondientes de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

2.3 Selección de especies

La selección de especies se realizó teniendo en cuenta sus características nativas: distribución natural, abundancia y presencia en zonas de ladera. De esta forma, las especies consideradas fueron: *Cercis canadensis* L. (Fabaceae), *Celtis laevigata* Willd. (Cannabaceae), *Quercus rysophylla* Weath. (Fabaceae) y *Ligustrum lucidum* W.T. Aiton (Oleaceae).

2.4 Determinación de la relación del área de la raíz

En el campo, se tomaron fotografías para calcular la relación del área de raíces (RAR), que se define como la fracción del área de la sección transversal del suelo ocupada por raíces por unidad de área (Gray y Leiser, 1982). Por otro lado, se utilizó el método de conteo de raíces por análisis de imágenes descrito por Vogt y Persson (1991) para calcular la relación de área de raíces, que consiste en el mapeo y conteo de las raíces expuestas a partir de una cuadrícula de imágenes para el cálculo. Este método emula el método tradicional propuesto por Bohm (1979) (Sánchez et al., 2017a). Esta medida de la raíz se tomó en el campo a cinco profundidades de 0 a 10 cm, 10 a 20 cm, 20 a 30 cm, 30 a 40 cm y 40 a 50 cm. Esto se realizó contando el número y el grosor de las raíces en el bloque de suelo (Figura 23).

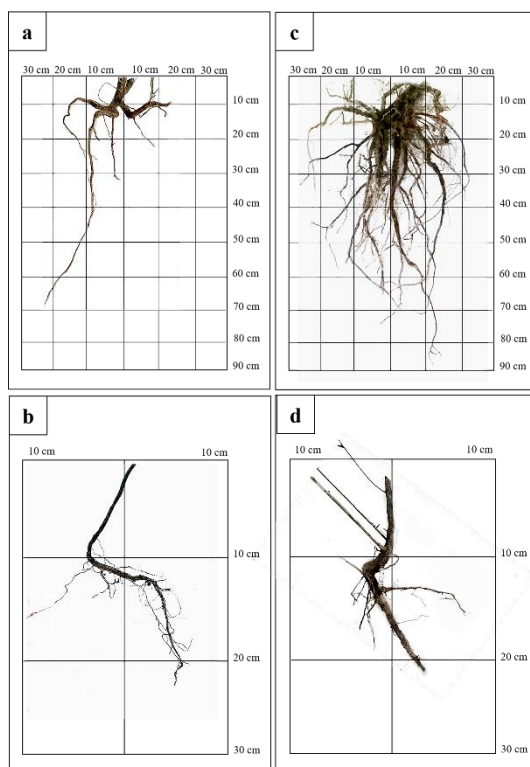


Figura 16. Ejemplos de raíces extraídas muestreadas en el área de estudio: a) *Celtis laevigata*, b) *Quercus rysophylla*, c) *Cercis canadensis*, d) *Ligustrum lucidum*.

2.5 Estimación de la cohesión suelo-raíz

La influencia de las raíces en el suelo (fijación) se puede expresar como un término de cohesión (O'Loughlin, 1974; Wu, 1976; Waldron, 1977) en los criterios de falla de Morh-Coulomb donde la resistencia a la corte compuesta suelo-raíz (S_r) se calcula de la siguiente manera:

$$S_r = c' + (\sigma - u) \tan \phi' + \Delta S$$

Donde: c' es la cohesión efectiva del suelo, σ es la tensión normal debida al peso del agua y el suelo de la masa deslizante, u es la presión del agua entre los poros del suelo, ϕ' es el ángulo de fricción efectivo del suelo y ΔS es la aparente cohesión que proporciona la presencia de raíces.

El modelo teórico desarrollado por Wu (1976), Waldron (1977) y Wu *et al.* (1979), para estimar el aumento de la resistencia al corte debido a la presencia de raíces, asume que las raíces son flexibles, elásticas y orientadas perpendicularmente a la superficie de deslizamiento cuando la capa de suelo se está moviendo. Esto se puede traducir en componentes tangenciales y normales, especificando cómo se orientan las raíces (componente normal) y la magnitud de la fuerza que se proporciona (componente tangencial). Suponiendo que el ángulo de fricción del suelo no se ve afectado (O'Loughlin, 1974), la cohesión adicional (ΔS) proporcionada por las raíces se puede calcular como:

$$\Delta S = tr (\sin \beta + \cos \beta \tan \phi')$$

Donde: tr es la resistencia a la tracción movilizada promedio de las raíces por unidad de área del suelo y β es el ángulo de distorsión de las raíces en la zona de corte. Los análisis de sensibilidad muestran que los valores de $(\sin \beta + \cos \beta \tan \phi')$ se pueden aproximar a 1,2 para $30^\circ < \phi' < 40^\circ$ y $48^\circ < \beta < 72^\circ$ (Wu *et al.*, 1979; Wu, 1995). Por tanto, la ecuación se puede simplificar como:

$$\Delta S = 1.2 \text{ tr}$$

y tr se puede calcular como:

$$tr \sum_{i=1}^n Tri (Ari | A)$$

Donde: Tri es la fuerza de tensión de una raíz individual (i) y (Ari | A) es la relación del área de la raíz o la proporción del área de la sección transversal de la raíz al área de la sección transversal del suelo.

Para evaluar la influencia de la resistencia al corte de la raíz en el suelo utilizando el Modelo Wu (Wu *et al.*, 1979) así como para analizar la cohesión radicular y la Relación de Área Raíz (RAR), este último se calculó tomando medidas directas (de campo) e indirectas en el procesamiento de imágenes.

2.6 Análisis estadístico

Los datos se analizaron utilizando el paquete estadístico para ciencias sociales (SPSS) versión estándar 13.0 para Windows (SPSS Inc., Chicago, IL.). Dado que los datos de la razón del área de la raíz (RAR) y la cohesión de la raíz (Cr) no mostraron los supuestos de distribución normal, estas variables se analizaron utilizando la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis (Steel y Torrie, 1980). Con el fin de analizar los valores de razón de área de raíces (RAR) y cohesión de raíces (Cr) para cada especie para la profundidad del suelo, se aplicó la prueba no paramétrica U de Mann-Whitney sin corrección a $p=.05$. Se generaron modelos de regresión de potencia para las especies de correlación con la resistencia a la tracción de la raíz ($p<.01$).

3. Resultados

3.1 Área de radio de raíz (RAR)

El análisis no paramétrico para el RAR muestra diferencias significativas en las tres primeras profundidades del suelo (0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm; (Tabla 12).

Tabla 12 Valores P de la prueba de Kruskal-Wallis, que indican la significancia ($p=.05$) entre la cohesión de la raíz (Cr) y los valores medios de RAR

Parámetro	Profundidad de suelo (cm)	Valor P
Cr	(0-10)	0.00001*
Cr	(10-20)	0.00032*
Cr	(20-30)	0.58232
Cr	(30-40)	0.08312
Cr	(40-50)	0.05539
RAR	(0-10)	0.0020*
RAR	(10-20)	0.0020*
RAR	(20-30)	0.0020*
RAR	(30-40)	0.84271
RAR	(40-50)	0.07293

(*) indica diferencias significativas, $p<.05$

Cercis canadensis tiene un sistema radicular típicamente denso y fibroso (Figura 2c), mientras que *Ligustrum lucidum*, *Celtis laevigata* y *Quercus rysophylla* tienen un sistema típico de raíces principales con ramificaciones (Figuras 2a, b y d). La distribución RAR con la profundidad para las cuatro especies nativas de árboles se muestra en la Tabla 13, donde las cuatro especies analizadas tienen un RAR más alto a la profundidad 1 (0 a 10 cm) y muestran una tendencia a un RAR más bajo a profundidades más bajas (Figura 24). Los valores máximos de RAR se observaron dentro de los 10 cm de profundidad para todas las especies, con una profundidad máxima de enraizamiento de 60 cm.

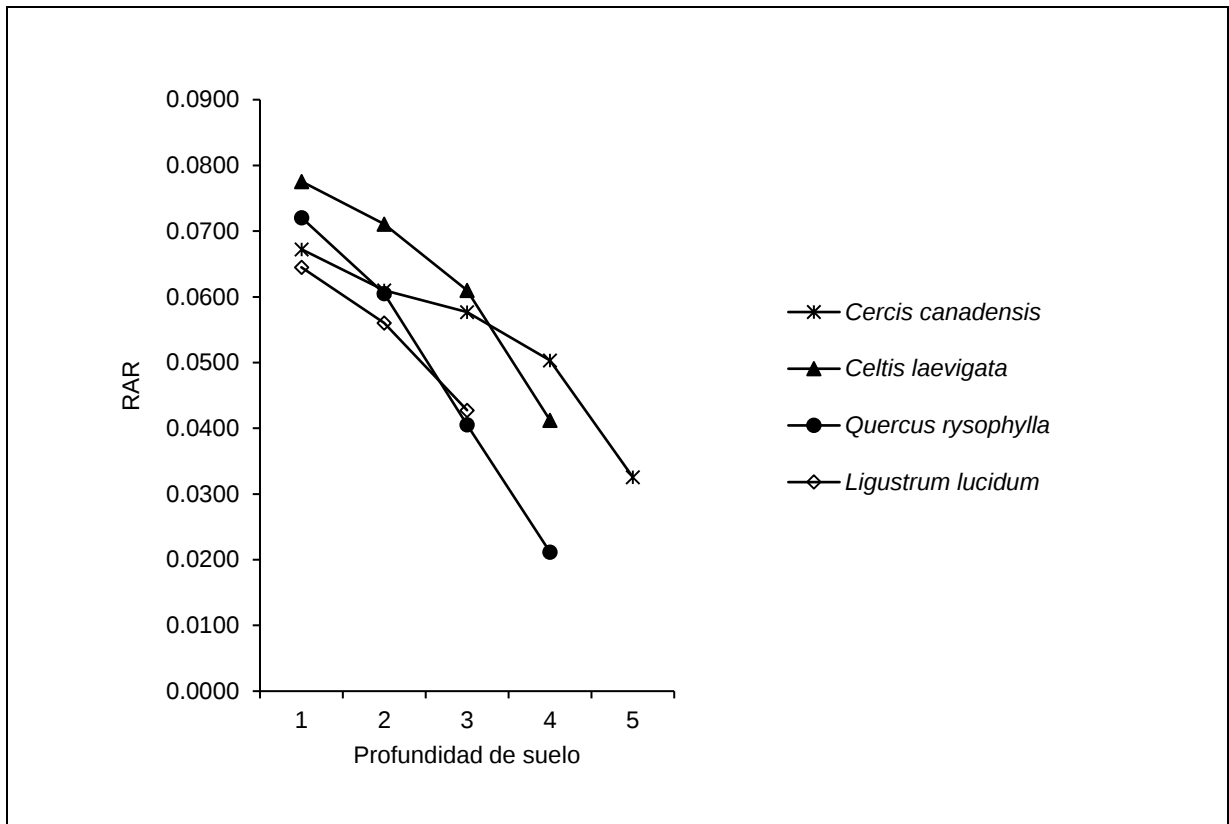


Figura 17. Distribución de la relación del área de la raíz (RAR, %) con la profundidad (1 = 0-10 cm; 2 = 10-20 cm; 3 = 20-30 cm; 4 = 30-40 cm; 4 = 40-50 cm) para cuatro especies de árboles nativos.

3.2 Cohesión de la raíz (Cr)

El valor p de las pruebas no paramétricas se muestra en la Tabla 13. Los valores de cohesión para las profundidades de suelo (0-10 y 10-20 cm) muestran diferencias significativas ($p=.0003$). Considerando la fuerza de las raíces con las distribuciones de RAR, la cohesión potencial del suelo debido a las raíces. La cohesión adicional de las raíces (Cr) proporcionada por los sistemas de raíces de diferentes especies de árboles nativos, calculada con el modelo de Wu, se muestra en la Figura 25.

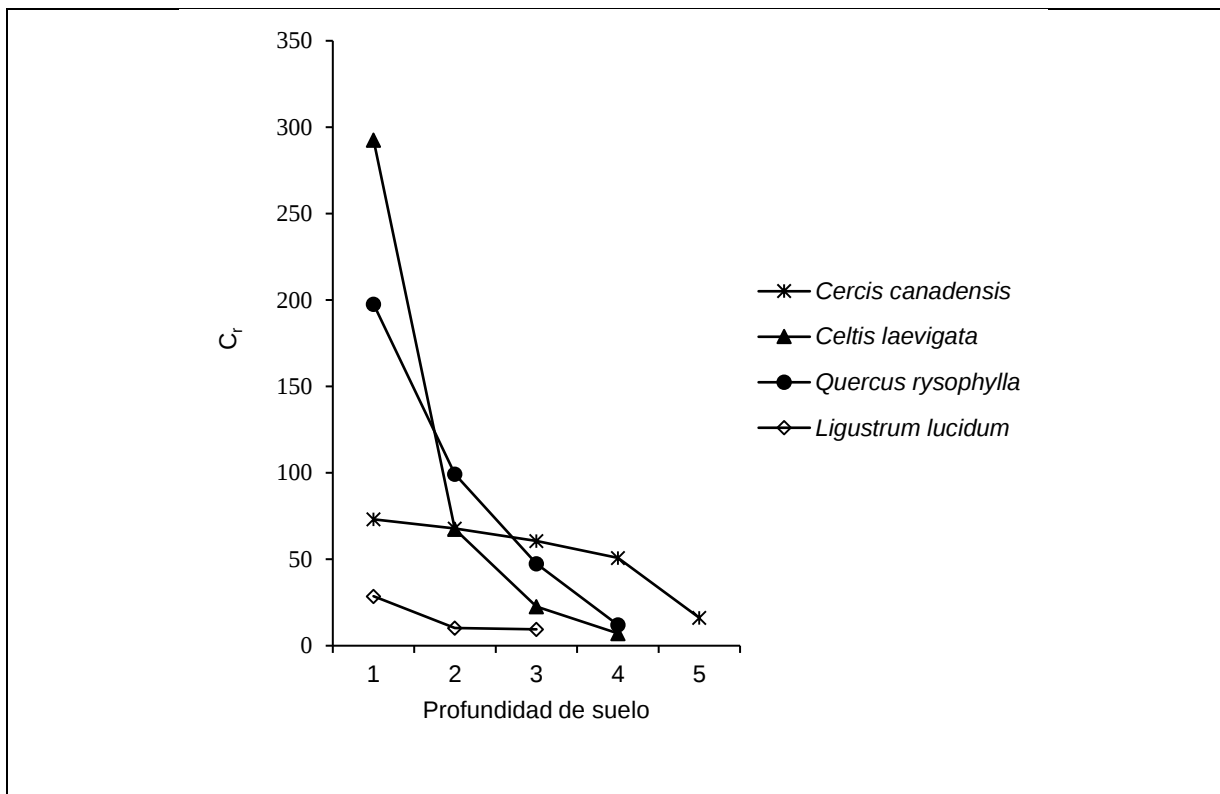


Figura 18. Relación entre la distribución de la cohesión radicular del suelo (C_r , kN/m^2) con el perfil de profundidad del suelo (1 = 0-10 cm; 2 = 10-20 cm; 3 = 20-30 cm; 4 = 30-40 cm; 5 = 40-50 cm) para cuatro especies de árboles nativos.

La cohesión adicional proporcionada por las raíces (C_r) para las cuatro especies analizadas varió de 16.13 a 73.12 kN/m^2 (*Cercis canadensis*), de 7.11 a 292.68 kN/m^2 (*Celtis laevigata*), de 12.01 a 197.67 kN/m^2 (*Quercus rysophylla*) y de 9.46 a 28.63 kN/m^2 (*Ligustrum lucidum*). La distribución de los valores medios de C_r se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13. Medias del radio de área de raíz (RAR) a diferentes profundidades del suelo en cuatro especies de árboles nativos.

Especie	<i>n</i>	Profundidad de suelo (cm)	Media de RAR (%)	Media de C_r (kN/m ²)
<i>Cercis canadensis</i>	42	0-10	0.06725	73.12
		10-20	0.06100	67.79
		20-30	0.05767	60.65
		30-40	0.05033	50.82
		40-50	0.03258	16.13
<i>Celtis laevigata</i>	36	0-10	0.07757	292.68
		10-20	0.07110	67.46
		20-30	0.06100	22.71
		30-40	0.04125	7.11
<i>Quercus rysophylla</i>	45	0-10	0.07207	197.67
		10-20	0.06050	99.23
		20-30	0.04057	47.39
		30-40	0.02118	12.01
<i>Ligustrum lucidum</i>	25	0-10	0.06450	28.63
		10-20	0.05606	10.30
		20-30	0.04275	9.46

4. Discusión

La distribución de las raíces en las diferentes profundidades del suelo es muy variable para la especie, pero se pueden observar algunas tendencias generales. Según lo informado por De Baets *et al.* (2007, 2008), para pastos y hierbas, la mayor proporción de su biomasa radical consiste en raíces menores de 5 mm de diámetro, para arbustos y árboles la distribución de raíces en las diferentes clases de diámetro de raíz es muy variable.

El comportamiento de la densidad de raíces generalmente consiste en disminuir con la profundidad. En la Figura 24, por ejemplo, se muestra una tendencia abrupta; los valores RAR son más altos en las primeras capas de suelo y disminuyen drásticamente a medida que alcanzan profundidades más bajas. Brundrett (1991), agregó que las raíces también varían en las tasas de crecimiento, la capacidad de crecimiento secundario, la esperanza de vida y las características estructurales. Es muy importante reconocer los diferentes tipos de raíz porque pueden tener muchas funciones. Las raíces laterales de orden superior son generalmente más delgadas y no sobreviven demasiado tiempo en comparación con las de orden inferior (Preti y Giadrossich, 2009; Nyambane y Mwea, 2011).

Las características mecánicas del sistema de raíces se evaluaron midiendo los valores de la relación de área de raíces (RAR) y la fuerza de tensión (reportada en el Capítulo I) de las muestras de raíces. Se obtuvieron los valores RAR (la relación de la suma de las áreas de las raíces al área del perfil del suelo que se cruzan) de las raíces para estimar la contribución de las raíces a la resistencia al corte del suelo. Se obtuvo el área transversal media ocupada por raíces para intervalos de profundidad del suelo de 10 cm. Todas las especies mostraron valores altos de RAR entre 10 y 30 cm de profundidad del suelo. En general, las especies utilizadas en este estudio tiene raíces poco profundas (profundidad máxima de raíz 0.65 m) y, por tanto, no podrían reforzar los suelos para evitar que los deslizamientos de tierra ocurran a más 0.65 m de profundidad.

La proporción del área de raíces disminuye drásticamente con la profundidad, porque las muestras de raíces analizadas en el presente estudio corresponden a diámetros pequeños, debido a las limitaciones de la máquina de prueba (Morgan y Rickson, 1995; Abernethy y Rutherford, 2001; Tosi, 2007; Sánchez *et al.*, 2017a). Además del RAR, el coeficiente de refuerzo de las raíces está influenciado por la genética de cada especie, las condiciones y las características del suelo y la pendiente (Stokes *et al.*, 2002; Bischetti *et al.*, 2005) que limitan los resultados a un área regional.

Según lo informado por Lee *et al.* (2020), se sugieren especies con raíces poco profundas y un sistema de raíz principal más corto para plantar en la cima de la pendiente (*Celtis laevigata* y *Ligustrum lucidum*), mientras que *Celtis laevigata* y *Cercis canadensis* con raíces principales más profundas y sistemas de raíces laterales más profusos se recomiendan para plantar en el medio de la pendiente.

La cohesión de las raíces generalmente disminuye al aumentar la profundidad del suelo. Sin embargo, en algunos casos, es posible tener una mayor cohesión de las raíces al aumentar la profundidad del suelo donde aumenta la proporción del área de las raíces (De Beats *et al.*, 2008). Cabe señalar que los valores de Cr calculados son relativos, ya que estudios recientes han mostrado una sobrestimación de las cohesiones radicales calculadas con el modelo de Wu (Operstein y Frydman, 2000; Pollen y Simon, 2005; De Beat *et al.*, 2008).

De manera similar a la distribución RAR, el efecto de cohesión de las raíces disminuye con la profundidad para *Celtis laevigata* y *Quercus rysophylla* (Figura 5), en cambio, los valores para *Cercis canadensis* y *Ligustrum lucidum* permanecen relativamente sin cambios por la profundidad del suelo. El coeficiente de cohesión adicional del suelo proporcionado por las raíces depende de factores del material de la raíz expresados como relación de área de raíces (RAR) en el plano de corte, por lo que las comparaciones con otros estudios no son fáciles ya que los resultados reportados típicamente tienen una gran variabilidad espacial pero una tendencia general (Coppin y Richards, 1990; Abernethy y Rutherford, 2001; Sánchez *et al.*, 2017a).

La metodología utilizada en este estudio sugiere el uso de la resistencia a la tracción de la raíz de muestras de 0.1 mm a 10 mm (limitaciones de la máquina de ensayo). Sin embargo, estos resultados se utilizaron para “extrapolar sobreestimar” las raíces de los sistemas de raíces expuestos probados donde los diámetros de las raíces variaban de 0.01 mm a 25 mm, siendo la razón de la “sobrevaloración” del Cr. Las raíces finas proporcionan la mayor resistencia a la tracción, sin embargo, todos los tipos de raíces tienen sus funciones únicas y son esenciales en el desarrollo de la planta (Jin *et al.*, 2019).

Tanto las raíces como el suelo tienen propiedades elásticas y plásticas con diferentes límites de tensiones máximas requeridas para la rotura debido a su génesis y composición. Las raíces pueden actuar como cemento como se ha sugerido (Wu *et al.*, 2001; Jin *et al.*, 2019) mejorando la fuerza de unión de las partículas del suelo. De esta manera, el presente estudio sugiere que el suelo y las raíces pueden comportarse como un material junto con mejores propiedades que por separado uno del otro.

Durante los deslizamientos de tierra, las raíces tienen un comportamiento plástico al igual que el suelo, comportándose juntas como "un sistema". El modelo teórico desarrollado por Wu (1976), Waldron (1977) y Wu *et al.* (1979), se utilizó para estimar el aumento de la resistencia al corte debido a la presencia de raíces. Este modelo asume que las raíces son flexibles, elásticas y están orientadas perpendicularmente a la superficie de deslizamiento, cuando la capa de suelo se está moviendo. Sin embargo, con base en los hallazgos del presente estudio, podemos identificar la profundidad de la cohesión del suelo proporcionada por las raíces en el rango de 0-30 cm.

5. Conclusiones

El valor más alto de fuerza de tensión de la raíz se encontró en *Celtis laevigata* (156.56 kN/m²) seguido de *Quercus rysophylla* > *Cercis canadensis* > *Ligustrum lucidum*. La relación RAR más alta se encontró también en *Celtis laevigata* (0-10 cm) seguida de *Quercus rysophylla* > *Cercis canadensis* > *Ligustrum lucidum*. El Cr más alto se encontró en *Celtis laevigata* (287.05 kN/m²) a la profundidad 1 (0-10 cm) seguido de *Quercus rysophylla* > *Cercis canadensis* > *Ligustrum lucidum*. Todas las especies mostraron las mayores RAR y Cr a la profundidad 1 (0-10 cm).

Debido a la sobreestimación del método de Wu, que ha sido mencionado en estudios previos, los resultados mostrados en la presente investigación representan valores promedio para cada especie. La razón del área de las raíces se observó como el factor que influye en el coeficiente de cohesión adicional proporcionado por las raíces en la pendiente. Todas las especies consideradas para este estudio contribuyeron a la resistencia al corte de la pendiente de manera positiva.

Estos resultados sugieren que las raíces de las especies nativas contribuyen a la cohesión del suelo a poca profundidad y destaca las propiedades óptimas del sistema de raíces que son responsables de ayudar a la cohesión. Estos hallazgos podrían ser útiles para las partes interesadas involucradas en proyectos de bioingeniería de pendientes en regiones donde pueden ocurrir deslizamientos de tierra.

BIBLIOGRAFÍA

- Abernethy, B., Rutherford, I.D. (2000). The effect of riparian tree roots on the mass-stability of riverbanks. *Earth Surface Processes and Landforms. The Journal of the British Geomorphological Research Group* 25(9): 921-937. <https://doi.org/10.1002/1096-9837> (200008) 25:9<921: AID-ESP93>3.0.CO; 2-7.
- Abernethy, B., Rutherford, I.D. (2001). The distribution and strength of riparian tree roots in relation to riverbank reinforcement. *Hydrological Processes* 15(1): 63–79. <https://doi.org/10.1002/hyp.152>
- Alanís, E., Jiménez, J., Espinoza, D. *et al.* (2008). Evaluación del estrato arbóreo en un área restaurada post-incendio en el Parque Ecológico Chipinque, México. *Revista Chapingo Sserie Ciencias Forestales y del Ambiente* 14(2): 113-118. <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.05.032>
- Alanís, E., Jiménez, J., Pando, M., Aguirre, O., Treviño, E., y Canizales, P. (2010). Analysis of the arboreal diversity in restaurated after-fire areas in the Ecological Park Chipinque, Mexico. *Acta Biológica Colombiana* 5: 309-324. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120548X2010000200021&lng=en&tlng=es.
- Alanís, G.M., González, M., Guzmán, Y.G., Cano, G. (1995). Flora representativa de Chipinque: árboles y arbustos, 1ª parte. Consejo Consultivo estatal para la preservación y fomento de la flora y fauna silvestre de Nuevo León, Subcomisión de flora. Monterrey, S.A. de C.V. México.
- Alvarado, V., Bermúdez, T., Romero, M., Vargas M., Piedra, L. (2013). Native plants for erosion control in urban river slopes. *Spanish Journal of Soil Science* 4: 99-109. DOI: <https://doi.org/10.3232/SJSS.2014.V4.N1.07>
- 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.
- Barros, J., Serk, H., Granlund, I., Pesquet E. (2015). The cell biology of lignification in higher plants. *Annals of Botany* 115: 1053-1074. DOI: <https://doi.org/10.1093/aob/mcv046>
- Bischetti, G. B., Chiaradia, E.A., Simonato, T., *et al.* (2005). Root strength and root area ratio of forest species in Lombardy (Northern Italy). *Plant Soil* 278: 11–22. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-0605-4>
- Bohm, W. (1979). Methods of studying root systems. Springer – Verlag, Berlin Heidelberg. New York. p188.
- Brendel, O., Llanetta, M., y Stewart, D., (2000). A rapid and simple method to isolate pure alpha-cellulose. *Phytochemical Analysis* 11: 7-10. DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1565\(200001/02\)11:1<7::AID-PCA488>3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1565(200001/02)11:1<7::AID-PCA488>3.0.CO;2-U)
- Brundrett, M.C., Abbott, L.K. (1991). Roots of jarrah forest plants. I. Mycorrhizal associations of shrubs and herbaceous plants. *Australian Journal of Botany* 39(5): 445-457. <https://doi.org/10.1071/BT9910445>

- Burroughs, E., & Thomas, R., (1977). Declining root strength in Douglas fir after felling as a factor in slope stability. (Vol. 190). Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station.
- Comino, E., Druetta, A. (2010). The effect of *Poaceae* roots on the shear strength of soils in the Italian alpine environment. *Soil and Tillage Research* 106(2): 194-201. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.11.006>
- Commandeur, P. R., y Pyles, M. R. (1991). Modulus of elasticity and tensile strength of Douglas fir roots. *Canadian Journal of Forest Research*, 21(1): 48-52.
- Coppin, N.J., Richards, I.G. (1990). Use of vegetation in civil engineering London: Construction Industry. *Research and Information Association*. p 23-36.
- Danjon, F., Barker, D., Drexhage, M., & Stokes, A. (2008). Using three-dimensional plant root architecture in models of shallow-slope stability. *Annals of Botany* 101: 1281-1293. DOI: <https://doi.org/10.1093/aob/mcm199>
- De Baets, S., Poesen, J., Knapen, A., et al. (2007). Root characteristics of representative Mediterranean plant species and their erosion-reducing potential during concentrated runoff. *Plant Soil* 294: 169–183. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9244-2>
- De Baets, S.D., Torri, D., Poesen, J., et al. (2008) Modelling increased soil cohesion due to roots with EUROSEM. Earth Surface Processes and Landforms. *The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 33(13): 1948-1963. <https://doi.org/10.1002/esp.1647>
- Delmer, D.P., & Amor, Y. (1995). Cellulose Biosynthesis. *Plant Cell* 7, 7(7): 987.
- Docker, B.B., & Hubble, T.C. (2008). Quantifying root-reinforcement of riverbank soils by four Australian tree species. *Geomorphology* 100(3-4): 401-418.
- Dupuy, L., Fourcaud, T., & Stokes A. (2007). A numerical investigation into the influence of soil type and root architecture on tree anchorage. *Eco-and Ground Bio-Engineering: The Use of Vegetation to Improve Slope Stability. Developments in Plant and Soil Sciences, vol 103. Springer, Dordrecht*. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5593-5_17
- Estrada, A.E., Marroquín de la Fuente, J. (1992). Leguminosas en el centro-sur de Nuevo León. Facultad de Ciencias Forestales. UANL. Rep. Cient. No. 10 (especial), Linares N.L. México, 258 pp. No. F/634.90972 R47/10. 1992.
- Faisal, A. (2010). Use of vegetation for slope protection: Root mechanical properties of some tropical plants. *International Journal of Physical Sciences* 5: 496-506. <http://www.academicjournals.org/IJPS>
- Fan, C.C., & Su, C.F., (2008). Role of roots in the shear strength of root-reinforced soils with high moisture content. *Ecological Engineering*, 33(2): 157-166.
- Flora of North America Editorial Committee, E. (Ed.). (1993). *Flora of North America: Volume 23: Magnoliophyta: Commelinidae (in Part): Cyperaceae (Vol. 23)*. Oxford University Press on Demand. ISBN 978-0-19-515207-4
- García, E. (1981). Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana. ISBN: 970-32-1010-4.
- García, E. (2004). Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). México: Instituto de Geografía, UNAM. ISBN: 970-32-1010-4

- García, M. (2013). Aspectos ecológicos de *Gerrhonotus infernalis* (Sauria: Anguidae) en el Parque Ecológico Chipinque, San Pedro Garza García, Nuevo León, México. Tesis de doctorado, Universidad Autónoma de Nuevo León. Repositorio Académico Digital UANL. <http://eprints.uanl.mx/3439/1/1080240825.pdf>
- Genet, M., Stokes, A., Fourcaud, T., Hu, X., Lu, Y. (2006). Soil fixation by tree roots: changes in root reinforcement parameters with age in *Cryptomeria japonica* D. Don. plantations. In *Interpraevent* (pp. 25-27).
- Genet, M., Kokutse, N., Stokes, A., et al. (2008). Root reinforcement in plantations of *Cryptomeria japonica* D. Don: effect of tree age and stand structure on slope stability. *Forest Ecology and Management* 256(8): 1517-1526. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.05.050>
- Genet, M., Li, M., Luo, T., 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: 311-320. DOI: <http://doi.org/10.1093/aob/mcq237>
- Genet, M., Stokes, A., Salin, F., et al. (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>
- Gindl, W., Grabner, M., Wimmer, R. (2001). Effects of altitude on tracheid differentiation and lignification of Norway Spruce. *Canadian Journal of Botany* 79: 815-821. DOI: <http://doi.org/10.1139/b01-060>
- Gray, D.H., Leiser, A.T. (1982). Biotechnical slope protection and erosion control. Van Nostrand Reinhold Company Inc, New York.
- Gray, D.H., Sotir, R.B. (1996). Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization: A practical Guide for Erosion Control. New York: John Wiley and Sons. p.30-45.
- Guerrero, J., Delgado, S., Cabello, G., Arce, R., Martínez, S. (2016). Movimientos en masa, un riesgo geológico latente en el área metropolitana de Monterrey, N.L., México. *Ciencia UANL* 19: 41-45. <http://eprints.uanl.mx/13180/1/Ciencia%20UANL%2019%2C82.pdf#page=43>
- Hales, T., Ford, C., Hwang, T., Vose, J., Band, L. (2009). Topographic and ecologic controls on root reinforcement. *Journal of Geophysical Research* 114: 1-17. DOI: <https://doi.org/10.1029/2008JF001168>
- Hathaway, R.L., y Penny, D. (1975). Root strength in some *Populus* and *Salix* clones. *New Zealand Journal of Botany. Z. J. Bot.* 13: 333-343.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. INEGI (1986). Síntesis Geográfica de Nuevo León. Secretaría de Programación y Presupuesto. México, D.F. 170.
- Jin, H.F., Shi, D.M., Zeng, X.Y., et al. (2019). Mechanisms of root-soil reinforcement in bio-embankments of sloping farmland in the purple hilly area, China. *Journal of Mountain Science*, 16(10): 2285-2298. <https://doi.org/10.1007/s11629-019-5476-x>
- Kazmierczak, A., Carter, J., (2010). Adapting to climate change using green and blue infrastructure. A database of case studies. University of Manchester (open access at http://www.grabseu.org/membersArea/files/Database_Final_no_hyperlinks.pdf).
- Klauditz, W., Marschall, A., Ginzl, W. (1947). For technology-lignified plant cell walls: determination of the porosity of pulp fibers from *Pinus merkusii* wood. *Wood Research* 4: 98-103. <https://doi.org/10.1515/hfsg.1947.1.4.98>

- Lagunes, E., Zavaleta, E. (2019). Función de la lignina en la interacción planta-nematodos endoparásitos sedentarios. *Revista Mexicana de Fitopatología* 34: 43-63. <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.1506-7>
- Lee, J. T., Chu, M. Y., Lin, Y. S., et al. (2020). Root traits and biomechanical properties of three tropical pioneer tree species for forest restoration in landslide areas. *Forests*, 11(2): 179. <https://doi.org/10.3390/f11020179>
- Maffra, C., Sousa, R., Sutili, F., and Pinheiro, R. (2019). The effect of roots on the shear strength of texturally distinct soils. *Floresta e Ambiente*, 26(3): 3-5. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.101817>
- Mattia, C., Bischetti, G.B., Gentile, F., (2005). Biotechnical characteristics of root systems of typical Mediterranean species. *Plant Soil* 278(1-2): 23-32.
- Meijer, G. J., Bengough, A. G., Knappett, J. A., et al. (2017). *In situ* root identification through blade penetrometer testing—part 2: field testing. *Géotechnique*, 68(4): 320-331. <https://doi.org/10.1680/jgeot.16.p.204>
- Montalvo, J., Chávez, G., Velasco, F., Navarro, I. (2010). Causes and effects of landslides in the Monterrey Metropolitan area, NE Mexico. *Nova Science Publishers, Inc.* In: *Landslides: Causes, Types and Effects*. 17-18.
- Morgan, R.P., Rickson, R.J. (2003). Slope stabilization and erosion control, a bioengineering approach. Tylor & Francis, London, 221–264. <https://doi.org/10.4324/9780203362136>
- Morgan, R.P.C., Rickson, R.J. (1995). Water Erosion Control in slope stabilization and erosion control: a bioengineering approach, (eds), E and FN Spon, London.p.133–190. <https://doi.org/10.4324/9780203362136>
- Nilaweera, N. S., Nutalaya, P. (1999). Role of tree roots in slope stabilization. *Bulletin of engineering Engineering geology Geology and the Eenvironment*, 57(4): 337-342. <https://doi.org/10.1007/s100640050056>
- Norris, J.E, Stokes, A., Mickovski, S.B., et al. (2008). Slope stability and erosion control: Ecotechnological Solutions VI, Hardcover, ISBN: 978-1-4020-6675-7, 290. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6676-4>
- Norris, J.E. (2005). Root reinforcement by hawthorn and oak roots on a highway cut-slope in Southern England. *Plant Soil* 278: 43–53. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-1301-0>
- Nyambane, O.S. y Mwea, S.K. (2011). Root tensile strength of 3 typical plant species and their contribution to soil shear strength; a case study: *Journal of Civil Engineering Research and Practice*, 8(1): 57-73. <https://doi.org/10.4314/jcerp.v8i1.69525>
- O'loughlin, C.L. (1974). The effect of timber removal on the stability of forest soils. *Journal of Hydrology*, 13(2): 121–134.
- Operstein, V., Frydman, S. (2000). The influence of vegetation on soil strength. *Ground Improv* 4: 81–89.
- Pollen, N. (2007). Temporal and spatial variability in root reinforcement of streambanks: accounting for soil shear strength and moisture. *Catena*, 69(3): 197-205. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.05.004>
- Pollen, N., & Simon, A. (2005). Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on stream bank stability using a fiber bundle model. *Water Resources Research* 41: 1–11. <https://doi.org/10.1029/2004wr003801>

- Preti, F., Giadrossich, F. (2009). Root reinforcement and slope bioengineering stabilization by Spanish Broom (*Spartium junceum* L.). *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(9): 1713-1726. <https://doi.org/10.5194/hess-13-1713-2009>
- Reubens, B., Poesen, J., Danjon, F., Geudens, G., Muys, B. (2007). The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: A review. *Trees* 21: 385-402. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-007-0132-4>
- Saifuddin, M., Osman, N., Rahman, M., Boyce, A. (2015). Soil reinforcement capability of two legume species from plant morphological traits and mechanical properties. *Current Science* 108: 1340-1347. https://pdfs.semanticscholar.org/f64d/a5d6a2bd09361c54a2bdc32dd59639dcb27c.pdf?_ga=2.195318565.869307689.1597088877-26958736.1597088877
- Sánchez, L. (2015). An integrated study of sediment related disaster prevents and erosion control for urbanized forest slopes in Nuevo León, México. PhD Thesis, Fac. of Bioresource and Bioenvironmental Sciences, Kyoto Univesity, 1-7, 36-39.
- Sánchez, L., Tetsuya, K., Cantú, I., Yáñez, I., Hasnawir, Pequeño, M. (2017b) Comparisons of the root mechanical properties of three native Mexican tree species for soil bioengineering practices. *Botanical Sciences* 95(2): 1-11. <https://doi.org/10.17129/botsci.802>
- Sánchez, L., Tetsuya, K., Hasnawir, Cantú, I. (2017a). Influence of root reinforcement of forest species on the slope stability of Sierra Madre Oriental, Mexico. *Journal of the Faculty of Agriculture. Fac. Agr., Kyushu University*, 62(1): 177-181.
- Schmid, I., & Kazda, M. (2001). Vertical distribution and radial growth of coarse roots in pure and mixed stands of *Fagus sylvatica* and *Picea abies*. *Canadian Journal of Forest Research*, 31(3): 539-548. <https://doi.org/10.1139/cjfr-31-3-539>
- Scippa, G., Michele, M., Di Iorio, A., Costa, A., Lasserre, B., Chiantane, D. (2006). The response of *Spartium junceum* roots to slope: anchorage and gene factors. *Annals of Botany* 97: 857-866. DOI: <https://doi.org/10.1093/aob/mcj603>
- Secretaria de desarrollo sustentable del estado de Nuevo León (2013). Atlas de riesgos para el estado de Nuevo León, 1: 8-22. <https://doi.org/10.1515/9783110226201.333>
- Segura, F., Echeverri, R., Li, A., Mejía, Al. (2007). Descripción y discusión acerca de los métodos de análisis de fibra y del valor nutricional de forrajes y alimentos para animales. *Vitae*, 14(1): 72-81. ISSN 0121-4004
- Simon, A., Pollen, N., Langendoen, E. (2006). Influence of two woody riparian species on critical conditions for streambank stability: Upper Truckee River, California 1. *Jawra Journal of the American Water Resources Association*, 42(1):99-113. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2006.tb03826.x>
- Sjostrom, E. (1993). Wood Chemistry Fundamentals and Applications. Second Edition Academic Press Inc, San Diego 293 pp.
- Stokes, A., Atger, C., Bengough, A., Fourcaud, T., Sidle R. (2009). Desirable plant root traits for protecting natural and engineered slopes against landslides. *Plant and Soil* 324: 1-30. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0159-y>
- Stokes, A., Douglas, G, Fourcaud, T., Giadrossich, F., Gillies, C., Hubble, T., Kim, J., Loades, K., Mao, Z., McIvor, I., Mickovski, S, .Mitchell, S., Osman, N., Phillips,

- C., Poesen, J., Polster, D., Preti, F., Raymond, P., Rey, F., Schwarz, M., Walker, L. (2014). Ecological mitigation of hillslope instability: ten key issues facing researchers and practitioners. *Plant and Soil* 377: 1-23. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2044-6>
- Stokes, A., Fourcaud, T., Hruska, J., (2002). An evaluation of different methods to investigate root system architecture of urban trees in situ: I. Ground-penetrating radar. *Journal of Arboriculture*, 28(1): 2–10.
- Stokes, A., Norris, J.E., Van Beek, L.P.H., Bogaard, T., Cammeraat, E., Mickovski, S.B., Jenner, A., Di Iorio, A., Fourcaud, T. (2008). How vegetation reinforces soil on slopes. *Slope stability Stability and Erosion Control: Ecotechnological solutions*. Springer, pp. 65-118. ISBN: 978-1-4020-6675-7
- Styczen, M.E., Morgan, R.P.C. (1995). Engineering properties of vegetation. *Slope Stabilization and Erosion Control: A Bioengineering Approach*. Taylor y Francis: London, UK. pp. 5-58. ISBN 0-203-37471-1
- Thomas, F., Molitor, F., Werner, W. (2014). Lignin and cellulose concentrations in roots of Douglas fir and European beech of different diameter classes and soil depths. *Trees* 28: 309-315. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-013-0937-2>
- Tosi, M. (2007). Root tensile strength relationships and their slope stability implications of three shrub species in Northern Apennines (Italy). *Geomorphology* 87: 268–283. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.09.019>
- Turmanina, V., (1965). On the strength of tree roots. Bulletin of the Moscow Society of Naturalists. *Biology Section*, 70: 36-45.
- Valenciaga, D., Chongo, B. (2004). La pared celular. Influencia de su naturaleza en la degradación microbiana ruminal de los forrajes. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 38: 343-350. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193017793001>
- Van Soest, P.V., Robertson, J.B. y Lewis B.A. (1991). Métodos para fibra dietética, fibra detergente neutra y polisacáridos sin almidón en relación con la nutrición animal. *Revista de Ciencia Lláctea*, 74 (10): 3583-3597. DOI: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2)
- Vogt, K.A., Persson, H. (1991). Measuring growth and development of roots. *Techniques and Approaches in Forest Tree Ecophysiology*, 477–501.
- Waldron, L.J. (1977). The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil. *Soil Science Society of America Journal*, 41(5): 843–849. <https://doi.org/10.2136/sssaj1977.03615995004100050005x>
- Wu, T.H. (1976). Investigation of landslides on Prince of Wales Island, Alaska. Ohio State University Department of Civil Engineering, *Geotechnical Engineering Report*, 5-93.
- Wu, T.H., McKinnell, W.P., Swanston, D.N. (1979). Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island. *Canadian Geotechnical Journal* 16: 19–33. <https://doi.org/10.1139/t79-003>
- Wu, Y., Liu, Q., QIAO, Y. K., PAN, K. W., ZHAO, C. M., & CHEN, Q. H. (2001). Species diversity changes in subalpine coniferous forests of different restoration stages and their effects on soil properties. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 25(6), 648.
- Yang, Y., Li, N., Zhang, Q. (2016). Effect of root moisture content and diameter on root tensile properties. *Plos One*, 11: 1-17. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0151791>

- Zavala, R., Cantú, I., Sánchez, L., González, H., Kubota, T., Hasnawir. (2019). Ten native tree species for potential use in soil bioengineering in northeastern Mexico. *Botanical Sciences*, 97: 291-300. DOI: <https://doi.org/10.17129/botsci.2131>
- Zhang, C. B., Chen, L. H., & Jiang, J. (2014). Why are fine tree roots are stronger than thicker roots: The role of cellulose and lignin in relation to slope stability. *Geomorphology*, 206: 196-202.
- Zhang, C., Chen, L., Jiang, J., Zhou, S. (2012). Effects of gauge length and strain rate on the tensile strength of tree roots. *Trees*, 26(5): 1577-1584. <https://doi.org/10.1007/s00468-012-0732-5>
- Zhang, C.B., Chen, L.H., Liu, Y.P., Ji, X.D., Liu, X.P. (2010). Triaxial compression test of soil-root composites to evaluate influence of roots on soil shear strength. *Ecological Engineering*, 36(1): 19-26.
- Zienkiewicz, O. C. y Taylor, R. L. (2000). Finite Element Method: Volumen 2 – Solid Mechanics. Butterworth Heinemann, London, 2000, 480 pp.