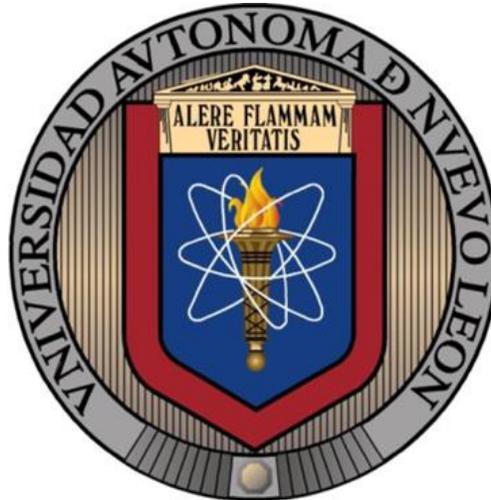


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



**RESISTENCIA DE RAÍCES EN ESPECIES NATIVAS PARA LA
ESTABILIDAD DE SUELOS RELACIONADOS CON LA PREVENCIÓN
DE DESASTRES**

POR

REBECA GUADALUPE ZAVALA GONZÁLEZ

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO
DE MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES**

DICIEMBRE, 2017

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



**TESIS
RESISTENCIA DE RAÍCES EN ESPECIES NATIVAS PARA LA
ESTABILIDAD DE SUELOS RELACIONADOS CON LA PREVENCIÓN
DE DESASTRES**

POR

REBECA GUADALUPE ZAVALA GONZÁLEZ

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO
DE MAestrÍA EN CIENCIAS FORESTALES**

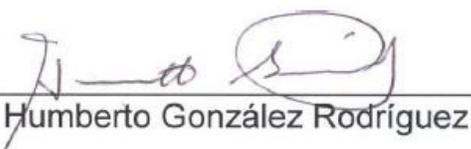
LINARES, NUEVO LEÓN, MÉXICO

DICIEMBRE, 2017

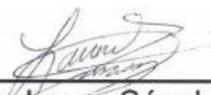
**RESISTENCIA DE RAÍCES DE ESPECIES NATIVAS PARA LA
ESTABILIDAD DE SUELOS RELACIONADOS CON LA
PREVENCIÓN DE DESASTRES**

Aprobación de tesis


Dr. Israel Cantú Silva


Dr. Humberto González Rodríguez


Dr. Andrés Eduardo Estrada Castellón


Dra. Laura Sánchez Castillo

DICIEMBRE, 2017

AGRADECIMIENTOS

Al **Consejo Nacional de Ciencia Y Tecnología (CONACYT)** por sustentar mediante una beca en el programa “Maestría en Ciencias Forestales”, de la Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León (FCF-UANL; CVU 745776), la realización de mi Maestría, así como toda la investigación dentro de éste estudio, al igual que una beca de movilidad al extranjero “Becas Mixtas 2016-2017”.

A la **Facultad de Ciencias Forestales**, muy especialmente al **Dr. Humberto González Rodríguez**, director de la Facultad de Ciencias Forestales, por el apoyo y financiación brindada.

A la **Sub-dirección de Posgrado** de la **Facultad de Ciencias Forestales**, y al Sub-director de Posgrado **Dr. Marco Aurelio González Tagle**.

A quiénes forman parte del **Comité Tutorial**; Infinitas gracias al **Dr. Israel Cantú Silva** por su increíble visión, disposición, conocimiento, y liderazgo. Al **Dr. Humberto González Rodríguez** y **Dr. Eduardo Estrada Castellón**, quiénes me ofrecieron su apoyo incondicional para llevar a cabo esta meta. A la **Dra. Laura Sánchez Castillo** por sus palabras de motivación, soporte académico, mejoras y todo el apoyo en toda índole para que la meta de éste estudio pudiera ser alcanzada.

Al personal docente de la **Facultad de Ciencias Forestales**: Dr. González Rodríguez, Dr. Cantú Silva, Dr. Estrada Castellón, Dr. Aguirre Calderón, Dr. Alanís Rodríguez, Dr. Cantú Ayala, Dr. Coterá Correa, Dr. Cuéllar Rodríguez, Dr. Garza Ocañas, Dr. González Saldívar, Dr. Guevara González, Dr. González Tagle, Dr. López Aguillón, Dr. Marmolejo Moncivais, Dr. Rocha Domínguez, Dr. Treviño Garza, Dr. Uvalle Saucedá, Dr. Villalón Mendoza, M.C. Yáñez Díaz por el invaluable conocimiento compartido a través de sus cátedras.

Al personal administrativo de la **Facultad de Ciencias Forestales** especialmente al **Administrativo de Posgrado** por su apreciada disponibilidad y agilidad con toda la documentación relacionada.

A todos los integrantes, compañeros y amigos del **Laboratorio de Suelos y Nutrición de Bosques**, mi segunda casa.

Nunca terminaré de agradecer a la **M.C. Ma. Inés Yáñez Díaz** por propuestas relacionadas a este trabajo; su inconcebible paciencia, generosidad, ayuda, consejos, apoyo y amistad, pero sobre todo muchas gracias por todo su invaluable tiempo.

A la **Dra. Laura Sánchez Castillo**, por aceptarme en Kyudai. Por enseñarme y aconsejarme en la investigación. Por sus recomendaciones en la escritura de resúmenes y presentaciones. Por brindarme su confianza y ayudarme durante mi estancia en Japón.

Gracias **M.C. Inés Yáñez Díaz** y **Dra. Laura Sánchez Castillo** por ser un gran ejemplo como investigadoras y personas, pero sobre todas las cosas, muchas gracias por su valiosa amistad.

A los compañeros del laboratorio de **Química de la Facultad de Ciencias Forestales: Ing. Elsa** y el **Sr. Manuel**, gracias por su solidaridad y respeto a lo largo de éstos dos años. Al laboratorio de **Tecnología de la Madera**, especialmente al **Ing. Alejandro**, gracias por su apoyo en todo momento y por compartir su conocimiento.

A los investigadores y profesores que forman parte del laboratorio de Control de Erosión, de la Universidad de Kyushu, en Fukuoka, Japón. Especialmente al **Dr. Tetsuya Kubota**, por las experiencias compartidas y el enriquecimiento científico que me brindó en seminarios y charlas. Al **Dr. Hideaki Mizuno** y al **Dr. Andang Suryana Soma**, por sus enseñanzas y apoyo durante mi estancia en su laboratorio. Al **Dr. Hasnawir** del Instituto de Makassar, Indonesia, por sus aportes y comentarios respecto a este trabajo.

Al **Ing. José Trinidad Martínez** por tanto apoyo, consejos, puntos de vista, respaldo y motivación desde antes que este estudio comenzara.

A todos los compañeros de **Posgrado** con quienes compartí clases y seminarios. A mis compañeros y amigos de generación.

A mis **amigos de toda la vida**: Clarissa, Rubí, Diana, Valeria, Alejandra, Katia, Mariel, Santiago, Yaretzi, Glenda, Cristina, Angélica, Marisela, Paulina y Jasiel, gracias por su amistad y por dejarme aprender de sus conocimientos. A mis padres, mi hermana y a las familias Zavala y González porque confiaron en mí y motivaron siempre.

DEDICATORIA

A Dios

*A mis padres: **María Guadalupe González Rascón** y **Luis Lauro Zavala Elizondo***

Por su soporte en cada momento de mi vida. Todo lo que tengo y lograré es y será siempre por su incondicional amor y sacrificio

*A mi hermana y “motivación”: **Diana Laura Zavala González***

EN MEMORIA

Amelia Elizondo Núñez** y **Juan Zavala Cabrera

Elodia Rascón** y **José González

ÍNDICE

1	Introducción	1
1.1	Hipótesis	3
1.2	Objetivo General	3
1.3	Objetivo Específico	3
1.4	Justificación	4
2	Antecedentes	6
3	Área de estudio y metodología	10
3.1	Localización de área de estudio	10
3.2	Selección de especies.....	13
3.4	Preparación de muestras de raíz para su análisis.....	24
3.5	Pruebas de fuerza máxima de quiebre.....	25
3.6	Análisis Estadístico	26
4	Resultados	28
4.1	Fuerza máxima de Quiebre de especies del Matorral Espinoso Tamaulipeco y Bosque de Pino-Encino.....	28
4.1.1	Análisis Estadístico.	28
4.1.2	Diámetros de raíz y fuerza máxima de quiebre.....	30
4.2	Fuerza de Tensión (T_s) de especies del Matorral Espinoso Tamaulipeco y Bosque de Pino- Encino.....	39
4.2.1	Análisis Estadístico.	39
4.2.2	Diámetro de Raíz y Fuerza de Tensión (T_s).....	40
5	Conclusiones.....	51
6	Referencias	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 ANOVA factorial de dos vías, especies y diámetros.	28
Tabla 2 Valores de Tukey ($p \leq 0.05$) para el diámetro de las especies. Valores en negrita indican diferencias significativas.	28
Tabla 3 Valores de Categorías diamétricas y subconjuntos	29
Tabla 4 Valores mínimos, máximos y promedio para los valores de las especies analizadas.....	31
Tabla 5 Valores medios para cada una de las categorías diamétricas, así como el promedio de valores entre ellas.	38
Tabla 6 Diferencias estadísticas entre interacción de especies - diámetro de raíz.....	40
Tabla 7 Máximo, mínimo y media de Fuerza de Tensión en las especies estudiadas	41
Tabla 8 Valores medios para cada una de las categorías diamétricas, así como el promedio.	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Deslizamiento en suelo superficial con pendiente bajo (a, c) y pendiente media (b).	5
Figura 2 Deslizamientos superficiales en roca madre en diferentes formaciones litológicas.	5
Figura 3 Localización de los sitios de estudio	10
Figura 4 Matorral Espinoso Tamaulipeco (a y b). Campus Facultad de Ciencias Forestales, Linares, Nuevo León.	12
Figura 5 Campus Bosque Escuela (UANL), bosque de Pino-Encino (a, b, c), Santa Rosa, Iturbide, Nuevo León	13
Figura 6 <i>Havardia pallens</i> . Individuos muestreados para pruebas (a, b, c) profundidad de suelo en el sitio (d).	14
Figura 7 <i>Acacia farnesiana</i> . Individuos muestreados (a, b y d) y profundidades c.	15
Figura 8 <i>Acacia rigidula</i> . Características del sitio de muestreo (a y b) e individuos muestreados (c).	16
Figura 9 <i>Cordia boissieri</i> . Características del sitio e individuos muestreados (a y b).	17
Figura 10 <i>Acacia berlandieri</i> . Características del sitio e individuos muestreados (a y b).	18
Figura 11 <i>Arbutus xalapensis</i> . Características del sitio e individuos muestreados (a, b y c).	19
Figura 12 <i>Pinus pseudostrobus</i> . Características del sitio e individuos muestreados (a y b).	20
Figura 13 <i>Quercus canbyi</i> . Características del sitio e individuos muestreados (a y b).	21
Figura 14 <i>Quercus pollymorpha</i> . Características del sitio e individuos muestreados (a y b).	22
Figura 15 <i>Quercus rysophylla</i> . Características del sitio e individuos muestreados.	23

Figura 16 Raíz expuesta y colecta de muestras	24
Figura 17 Empaquetado por clasificación diamétrica.....	24
Figura 18 Muestras de categoría diamétrica III (6 a 10 mm) de <i>Havardia pallens</i>	25
Figura 19 Posicionamiento de raíces en la Universal Shimadzu tipo SLFL-100kN	26
Figura 20 Test finalizado correctamente (a) y grafico generado en el software Trapezium (b).....	26
Figura 21 Medias de fuerza máxima de quiebre, con su respectivo error estándar por especie.	29
Figura 22 <i>Sp MET. A. farnesiana, C. boissieri, H. pallens, A. rígida, A. berlandieri, Sp Bosque Pino- Encino A. xalapensis, P. pseudostrobus, Q. canbyi, Q. polymorpha, Q. rysophylla.</i>	30
Figura 23 Relación positiva entre fuerza máxima de quiebre y el diámetro de raíz.....	33
Figura 24 Relación positiva entre fuerza máxima de quiebre y el diámetro de raíz.....	34
Figura 25 Relación positiva entre fuerza máxima de quiebre y el diámetro de raíz.....	35
Figura 26 Valores promedios de fuerza máxima de quiebre por categoría de diámetro de la raíz para especies del Matorral Espinoso Tamaulipeco.	36
Figura 27 Valores de fuerza de quiebre por categoría de diámetro para especies del Bosque de Pino-Encino.....	37
Figura 28 Valores de fuerza máxima de quiebre por categoría de diámetro para especies del MET y del Bosque de Pino-Encino.....	38
Figura 29 Relación entre el diámetro de raíz y fuerza de tensión para las especies estudiadas.	42
Figura 30 Relación entre el diámetro de raíz y fuerza de tensión para las especies estudiadas.	43
Figura 31 Relación entre el diámetro de raíz y fuerza de tensión para las especies estudiadas.	44

Figura 32. Valores de Fuerza de tensión (Ts) por categoría de diámetro para especies del MET. 46

Figura 33 Valores de fuerza de Tensión por categoría de diámetro para especies del Bosque de Pino-Encino..... 47

Figura 34 Valores de fuerza de tensión por categoría de diámetro para especies del MET y del Bosque de Pino- Encino..... 47

RESUMEN

En los últimos años, el efecto de la vegetación en la estabilidad de taludes ha jugado un papel muy importante en la bioingeniería de suelos. Sin embargo, debido a diferentes causas, como el registro de terremotos de pequeña escala o el aumento de ocurrencias de eventos de lluvia, muchas pendientes se encuentran en una condición potencialmente inestable, por lo que los movimientos se pueden iniciar fácilmente. El objetivo de este estudio es estimar la resistencia a la tracción proporcionada por las raíces y analizar si existen diferencias entre las especies de dos ecosistemas diferentes: Matorral Espinoso Tamaulipeco y Pinos-encino del bosque. A través de un estudio crítico y profundo, se evaluará la fuerza máxima de quiebre de las raíces en diferentes tipos de especies arbóreas localizadas en el estado de Nuevo León, sitio 1: *Acacia berlandieri*, *Cordia boissieri*, *Acacia rigidula*, *Havardia pallens*, *Acacia farnesiana*; sitio 2: *Quercus rysophylla*, *Pinus pseudostrobus*, *Quercus canbyi*, *Quercus polymorpha*, *Arbutus xalapensis*; Con el fin de estimar la influencia de las especies forestales en la estabilidad de taludes. Las especies consideradas fueron seleccionadas en base a sus características nativas y su presencia en laderas. Las pruebas realizadas con la Máquina de Universal Shimadzu tipo SLFL-100KN demostraron que la fuerza máxima de quiebre (N) 871.87 N se mostró en *Acacia berlandieri* y la fuerza mínima de quiebre (N) 33.12 para *Cordia boissieri*. Sin embargo, los resultados de fuerza de tensión mostrados, en orden ascendente, *C. boissieri* < *Arbutus xalapensis*, *Pinus pseudostrobus*, *Havardia pallens*, < *Quercus polymorpha* < *Acacia farnesiana* < *Quercus canbyi* < *Quercus rysophylla* < *Acacia rigidula* < *Acacia berlandieri*. Los resultados explican la relación entre la fuerza de tensión y los diámetros de las especies estudiadas.

ABSTRACT

In recent years, the effect of vegetation on slope stability has been playing a very important role in soil bioengineering. However, small-scale earthquakes, deficient urban planning or the increasing intensity of rainfall events are increasing the potential occurrence of sediment related disasters, many slopes are in a potentially unstable condition and movements can be started easily. The objective of this study is to estimate the tensile strength of native vegetation species and analyze if there are differences between species in two different ecosystems: Tamaulipan thornscrub and Pine-Oak forest. Through critical and in deep study, the root tensile strength were evaluated for different tree species located in Nuevo León state, site 1: *Acacia berlandieri*, *Cordia boissieri*, *Acacia rigidula*, *Havardia pallens*, *Acacia farnesiana*; site 2: *Quercus rysophylla*, *Pinus pseudostrobus*, *Quercus canbyi*, *Quercus polymorpha*, *Arbutus xalapensis*. The selection of species considered for this study was made based on their native characteristics and presence on slopes. The species considered were selected based on their native characteristics and existence on slopes. Tests were conducted with the Universal Testing Machine Shimadzu type SLFL-100KN. The highest value of Maximum force to breakage (N) was observed in *Acacia berlandieri* (871.87 N) and the minimum value on *Cordia boissieri* (33.12 N). The results of tensile strength by species in ascending order were observed as: *C. boissieri* < *Arbutus xalapensis*, *Pinus pseudostrobus*, *Havardia pallens*, < *Quercus polymorpha* *Acacia farnesiana* < *Quercus canbyi* < *Quercus rysophylla* < *Acacia rigidula* < *Acacia berlandieri*. The results of this study explained the relationship between tensile strength and diameters of the studied species.

INTRODUCCIÓN

Desastres relacionados con deslizamientos e influencia de la fuerza de tensión en raíces en el refuerzo de laderas

En los últimos años el efecto de la vegetación sobre la estabilidad de laderas ha sido muy debatido. Sin embargo, a causas diversas como por ejemplo el aumento de ocurrencias de eventos de lluvias o registro de sismos de pequeña escala, muchas laderas se encuentran en una condición potencialmente inestable, de manera que los movimientos se pueden iniciar con facilidad.

Sin embargo, cabe mencionar que los procesos de deslizamientos en laderas también son afectados por causas antropogénicas, como la intervención del hombre en el ambiente natural en forma de asentamiento humano, explotación de recursos minerales, apertura de taludes para la construcción de carreteras, deforestación, etc. En muchas ocasiones las causas que desencadenan las inestabilidades del terreno se deben a una combinación de factores naturales y antropogénicas.

Dichos movimientos pueden estar ligados a diferentes factores. Por un lado, la roca madre donde se está asentado el suelo puede ser poco resistente o estar caracterizado por la presencia de sistemas de debilidad como diaclasas, fracturas, fallas, etc., lo cual implica una inestabilidad latente. O bien, las laderas pueden estar expuestas a factores externos, tales como, la erosión. Haciéndose énfasis en esta última, se recalca la gran importancia que tiene el agua en la estabilidad de un talud. Es quizá el principal agente desencadenante de un gran número de movimientos de inestabilidad, debido a la disminución de resistencia a la que esta da lugar y al aumento de presiones intersticiales.

Diversos estudios han previsto las variaciones de las precipitaciones en el clima de México y como éstas inciden en los procesos de remoción en masa o

movimientos en masa los cuales han provocado daños materiales y pérdidas humanas. Por lo que respecta a las precipitaciones, no sólo influye el volumen total anual, sino también la distribución estacional, el régimen y su intensidad. (Alcántara- Ayala, 2002).

Los desastres relacionados con deslizamientos son definidos, por autores como Scheidegger (1998), como deslizamientos, movimientos o modificaciones del terreno, de masas de roca, tierra o escombros, sin embargo, éste estudio enfocará su aplicación en deslizamientos superficiales. Los desastres relacionados con sedimentos se definen como los fenómenos que causan daños indirectos a las vidas y propiedades de las personas, inconvenientes para la vida diaria y/o el deterioro del medio ambiente, a través de un movimiento a gran escala de suelo y roca (Ministerio de Tierra, Infraestructura y Transporte de Japón, 2004)

La vegetación produce efectos positivos, como lo es el mantener la estabilidad superficial del terreno y evitar su degradación. Así mismos estudios previos han demostrado que la ausencia de vegetación aumenta la erosión en suelos con pendientes ya que las raíces cohesionan las partículas del suelo y disminuyen la disgregación en los niveles superficiales (Collison et al., 1995). La presencia de una cobertera vegetal también favorece el drenaje por la absorción del agua superficial del terreno, al tiempo que disminuye el efecto producido por la erosión hídrica.

Además de dichos efectos positivos, la aplicación de medidas de refuerzo con especies nativas para restaurar laderas afectadas tiene otros beneficios: se ha aceptado como una solución de bajo costo, especialmente en áreas tropicales húmedas, ecológicamente amigable, y de fáciles técnicas (Zhang et al., 2015).

HIPÓTESIS

Las raíces de las especies investigadas presentan diferencias en la fuerza máxima de quiebre respecto a su diámetro. Así mismo existe una relación entre la fuerza de tensión y el diámetro de las raíces cuyo valor está vinculado con el aporte de refuerzo que existe entre el sistema radicular y el suelo en las laderas donde se encuentran.

OBJETIVO GENERAL

Calcular las propiedades mecánicas relacionadas con la estabilidad de suelos de las raíces de especies nativas de dos ecosistemas del estado de Nuevo León.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Obtener los valores de la fuerza máxima de quiebre y fuerza de tensión por especie.
- 2) Establecer diferencias entre los valores por especie, categoría diamétrica y ecosistema.
- 3) Establecer las especies con valores superiores para su uso potencial en la prevención de desastres

JUSTIFICACIÓN

La casi totalidad de los movimientos de ladera registrados en la Sierra Madre Oriental han tenido lugar debido a la variedad de litologías aflorantes (Fig. 1 y 2) composición mineralógica y de la textura, compactación, tamaño, forma y cementación de las partículas que formen la roca o sedimento en esta cadena montañosa. Esto favorece diferentes tipologías de movimientos, destacando los deslizamientos de laderas, tanto profundos como someros y los desprendimientos rocosos.

Agregando a esto una rápida urbanización, deforestación y proceso de industrialización, la morfología de las pendientes ha cambiado. La construcción y el incremento de la ocurrencia de eventos hidrometeoro-lógicos que ha estado ocurriendo en el Nuevo León durante los últimos años, ponen en riesgo la seguridad de los ciudadanos causando la desestabilización de las laderas forestales urbanizadas.

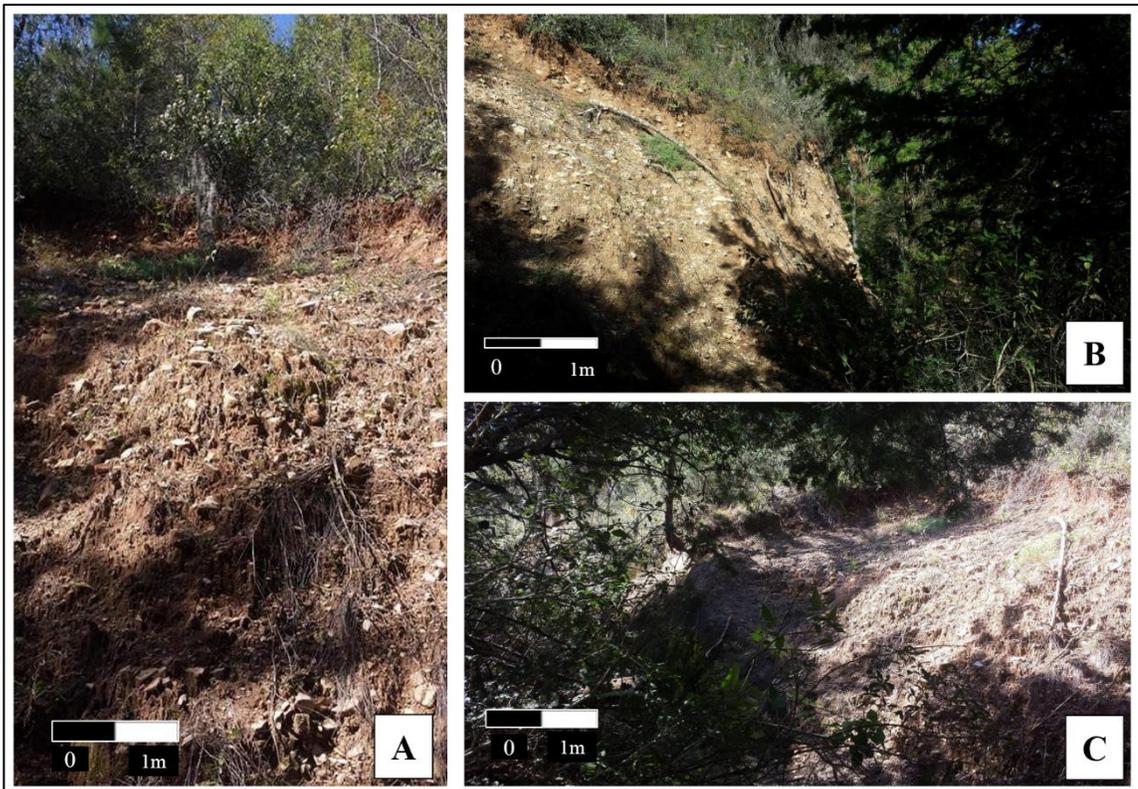


Figura 1 Deslizamiento en suelo superficial con pendiente bajo (a, c) y pendiente media (b).

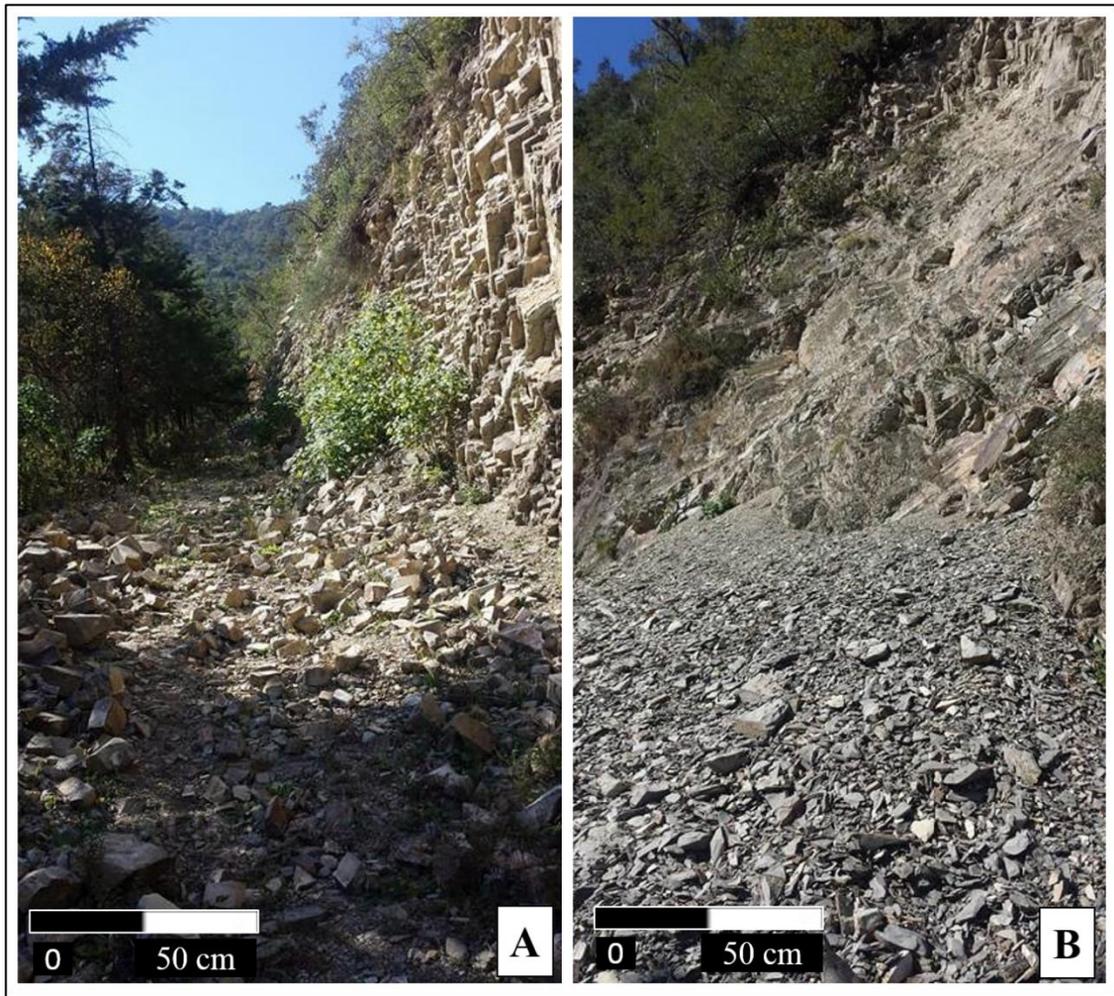


Figura 2 Deslizamientos superficiales en roca madre en diferentes formaciones litológicas.

ANTECEDENTES

La destrucción progresiva de los bosques ha incrementado la ocurrencia de deslizamientos (Harwood, 1996; Fischer y Vasseur, 2000; Sidle, 2005).

Las comunidades de plantas herbáceas protegen al suelo de la erosión de lluvia, mejora la tasa de infiltración y provee superficie adicional y anclaje para el suelo. (Sánchez, 2015).

El papel de la fuerza de tensión en las raíces es importante para el propósito de estabilizar laderas. Como han mencionado Cammerat et al., (2005) el sistema radicular refuerza mecánicamente el suelo transfiriendo el esfuerzo cortante en el suelo a resistencia de tracción en las raíces.

Para ello Van Beek et al., (2005), consideran dentro de las principales características de la arquitectura o morfología del sistema raíz, tomarse en cuenta la biomasa de las raíces (masa del sistema radicular), la extensión de la raíz, profundidad de enraizamiento y la distribución de raíces. Así mismo Stokes et al., (1996) demuestran que las magnitudes de estos son a menudo controladas por el sitio de ubicación del espécimen (geología, topografía, tipo y profundidad del suelo, clima, densidad del terreno y edad del árbol).

Además, De Baets et al. (2008), afirman que el número y el tamaño de las raíces que cruzan la superficie de deslizamiento son extremadamente importantes, especialmente el patrón de ramificación, teniendo, este último una estrecha relación con la fuerza del anclaje. De acuerdo con Baets et al. (2008), la diferencia en la fuerza de tensión entre las especies de plantas está ligada a la morfología de la raíz, los patrones de crecimiento, su capacidad para adquirir recursos y, en consecuencia, su capacidad competitiva.

Para ello, se han llevado a cabo diversos estudios, tales como, Operstein y Frydman (2000) en el que realizaron pruebas de fuerza de tensión en cuatro

especies mediterráneas (*Medicago sativa*, *Rosmarinus officinalis*, *Pistacia lentiscus* y *Cistus sp.*). Mientras que Mattia et al. (2005) investigaron las características biotecnológicas de tres especies de plantas mediterráneas (*Atriplex halimus*, *Lygeum spartum* y *Pistacia lentiscus*). Sin embargo, el número de especies arbustivas estudiadas sigue siendo muy restringido.

La relación entre la fuerza de tensión y el diámetro de la raíz fue explicada por Genet et al. (2005) atribuyendo que la disminución de la fuerza de tensión del diámetro de la raíz está en relación con las diferencias en la estructura de éstas.

La ausencia de una relación entre la fuerza máxima de quiebre, la fuerza de tensión de la raíz y diámetro de la raíz, sería sorprendente, dado el número de factores distintos que controlan el diámetro de raíz y sus variaciones en la edad (Genet et al. 2005). Por ejemplo, Pollen y Simon, (2005) encuentran que en la especie *Anthyllis cytisoides* la tasa de crecimiento, está dirigida por variaciones en el suelo, tales como el contenido de humedad, textura del suelo y estado nutricional, cuyos valores son responsables de la variabilidad de la fuerza máxima de quiebre de la raíz.

Karrenberg et al. (2003) afirma que el tipo o características en la corteza de la raíz también puede explicar la mala correlación entre la fuerza de tensión y el diámetro de las especies. En su estudio con *Ononis tridentata*, *Anthyllis Cytisoides* y *Retama sphaerocarpa*, dichas especies tenían bastante espesor de corteza de raíz. Así mismo también afirman que el total del diámetro de la raíz no es un indicador confiable para las especies con corteza con espesor considerable.

Sin embargo, también existen variables que no perjudican la relación entre la fuerza de tensión y el diámetro de la raíz, tal es así, en el estudio de Bischetti et al. (2003), demostraron que almacenar las raíces en alcohol por varios meses

no afectó mucho a la fuerza de tensión en las raíces de *Atriplex halimus* y *Lygeum spartum*

Sánchez Castillo, (2015) en su estudio de pruebas de fuerza de tensión de raíz de especies herbáceas mostró que *Abutilum incanum* y *Turnera difusa* son recomendables para control de erosión. Respecto a las especies arbóreas las pruebas hechas en la máquina universal SHIMADZU tipo SLFL-100kN mostraron que la máxima fuerza de quiebre (N) en especies arbustivas osciló entre 15 y 706 N.

R. Naghdi et al., (2013) evaluó en el efecto de las raíces de *Alnus subcordata* en 39 pruebas de fuerza de tensión sobre la estabilidad de una ladera, mostrando en sus resultados obtenidos que la densidad de raíz y el número de raíces disminuyeron con el aumento de la profundidad. La fuerza de tensión disminuyó con el aumento del diámetro de las raíces lo que es similar a estudios previos (Morgan, Rickson 1995; Norris et al. 2008).

Así mismo Abdi et al., (2010) mostraron que la fuerza de tensión disminuye con el aumento del diámetro y la relación entre estas dos variables sigue una función de potencia negativa. El resultado obtenido es consistente con los hallazgos de muchos investigadores (Gray y Sotir 1996; Bischetti et al., 2005; Tosi 2007; Burylo et al, 2011; Ji et al., 2012).

Es importante mencionar que estos resultados son sensibles al número y diámetro de las muestras (Tosi, 2007) y también la variación de la fuerza de tensión puede estar relacionada con los cambios en la relación lignina y celulosa. Esta relación a su vez está influenciada por la temporada y los factores abióticos como el estrés mecánico (Plomion et al., 2001). Genet et al., (2005) encontraron que más celulosa dará lugar a raíces más fuertes.

La fuerza de tensión, aunque es importante cuando se evalúa a la raíz en la contribución a la estabilidad del suelo, es sólo uno de una mezcla de parámetros que deben considerarse para el análisis en la selección de especies durante la evaluación de la estabilidad de la ladera.

Sería errónea considerar solo estos parámetros para escoger especies vegetales para el control de la erosión basadas únicamente en la fuerza de quiebre y la fuerza de tensión de las raíces. Investigadores han descrito estudios de estabilidad raíz-suelo, por ejemplo, Abernethy & Rutherford (2001); Barker et al. (2004); Easson & Yarbrough (2002); Ekanayake & Phillips (1999); Gray & Leiser (1982); Gray & Sotir (1996); Wu (1976); Wu et al. (1979) y Wynn et al. (2004) considerando estos parámetros como base para su estudio.

ÁREA DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA

3.1 Área de estudio

El área de estudio está ubicada en el estado de Nuevo León, México. La superficie territorial del estado de Nuevo León es de 64.220 kilómetros cuadrados. La elevación en Nuevo León va de 50 m en el norte del estado a 3500 m en el sur del estado, lo que da para Nuevo León, diferentes comunidades de vegetación, edafología y geología (figura 3). Los sitios de estudio se encuentran dentro del cinturón plegado y cabalgado Sierra Madre Oriental (Goldhammer, 1999; Torres *et al.*, 1999).

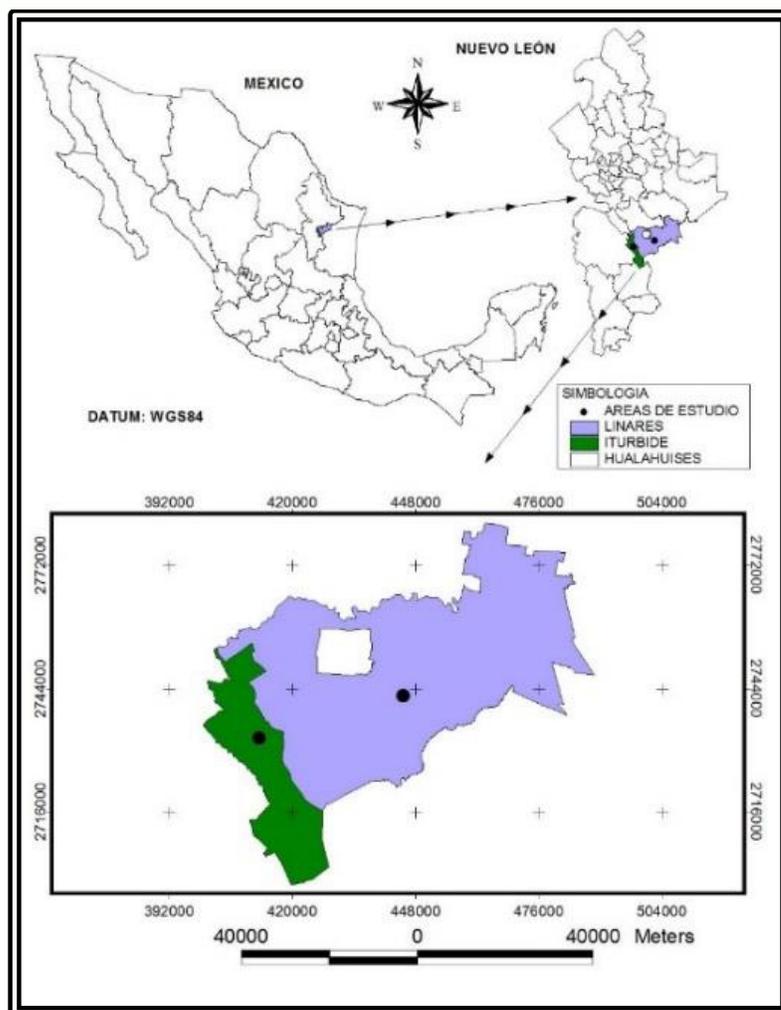


Figura 3 Localización de los sitios de estudio

El cinturón plegado y cabalgado de la Sierra Madre Oriental corresponde a una cadena montañosa situada en el oriente de México, extendiéndose desde Parral, Chihuahua hasta Zongolica, Veracruz; está compuesta de rocas sedimentarias marinas clásticas y calcáreas del Mesozoico que sobreyacen a rocas del Precámbrico, Paleozoico y Mesozoico que integran el basamento del NE de México (Padilla y Sánchez, 1982; Wilson, 1990; Goldhammer *et al.*, 1991; Michalzik y Schumann, 1994).

El paquete sedimentario que compone a la SMO fue depositado durante el desarrollo de una margen pasiva relacionada con la formación del Golfo de México. A partir del Triásico Tardío hasta el Berriasiano en el NE de México, inició la fragmentación de la Pangea que condujo a la generación de fosas y pilares que fueron paulatinamente invadidos por el mar y que controlaron ampliamente las facies sedimentarias marinas a partir del Calloviano, depositándose primero gruesas secuencias de evaporitas y posteriormente rocas calcáreo-arcillosas, calcáreas y finalmente clástico-calcáreas durante la regresión marina regional disparada por el inicio de la orogenia Laramide en el norte de México (Padilla y Sánchez, 1982; Michalzik y Schumann, 1994; Goldhammer *et al.*, 1991; Goldhammer, 1999).

Este estudio se llevó a cabo en dos diferentes áreas dentro del estado de Nuevo León para los objetivos descrito en esta tesis.

1.- Matorral Espinoso Tamaulipeco ubicado en la estación experimental de la Facultad de Ciencias Forestales en Linares, Nuevo León. (N 24° 47 ', W 99° 32'), con una elevación de 350 metros sobre el nivel del mar, 8 kilómetros de la ciudad de Linares, en el estado de Nuevo León (Figura 4). El clima de la zona corresponde a un clima subtropical semiárido con temperaturas promedio que varían entre 14.7 ° C en enero y 22.3°C en agosto, aunque se registran temperaturas hasta 45 ° C s durante el verano. El promedio anual de lluvia es

de 805 mm, la mayor parte de la precipitación se registra en los meses de mayo, junio y septiembre) (Alanís et al., 2008).

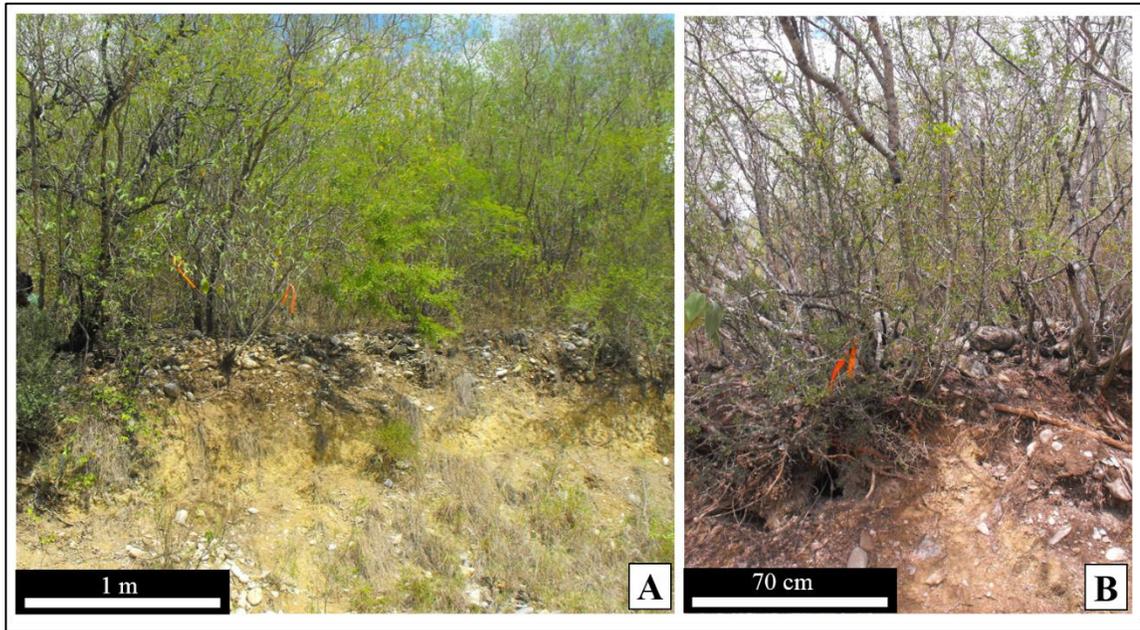


Figura 4 Matorral Espinoso Tamaulipeco (a y b). Campus Facultad de Ciencias Forestales, Linares, Nuevo León.

2.-Bosque de Pino y Encino “Bosque Escuela” de la Universidad Autónoma de Nuevo León ubicado en Iturbide Nuevo León. Ubicada en la cordillera Sierra Madre Oriental (24°42'N; 99°51'W), 15 km al sureste de Iturbide en el estado de Nuevo León, México. Está situado en una elevación de 1640 metros sobre el nivel del mar (figura 5). La media anual de temperatura es de 13,9 ° C y la precipitación media anual es de 639 mm. La vegetación general de la zona es un bosque de pino con especies como *Juniperus flaccida*, *Pinus pseudostrobus*, *Quercus rysophylla* (Synnott y Marroquín, 1987).



Figura 5 Campus Bosque Escuela (UANL), bosque de Pino-Encino (a, b, c), Santa Rosa, Iturbide, Nuevo León

3.2 Selección de especies

Los problemas comunes de erosión en las laderas forestales de México se deben principalmente a las prácticas de sobrepastoreo y deslizamientos notorios en laderas con escasa vegetación hacienda de las laderas puntos propensas a desastres relacionados con sedimentos. Las especies consideradas fueron seleccionadas en base a sus características nativas y amplia distribución en las laderas, adaptabilidad ambiental y facilidad de disponibilidad.

Sitio 1 Matorral Espinoso Tamaulipeco.

1.- *Havardia pallens* (Benth): Es un arbusto o árbol pequeño de 3 a 6m de altura. El tronco tiene espinas y la corteza es lisa, gris a color rojizo. Las hojas son verde grisáceo, bipinadas, de 10 a 15cm de largo, con 7 a 20 pinas (pares de foliolos), cada uno con 30-40 foliolos. Las flores son fragantes y tiene un color crema, en forma de bola de 1.3-2.5cm de diámetro, aparecen de mayo a mediados de septiembre. El fruto es una vaina plana color café de 5.12 cm de largo (Wildflower, 2014) (Figura 6).

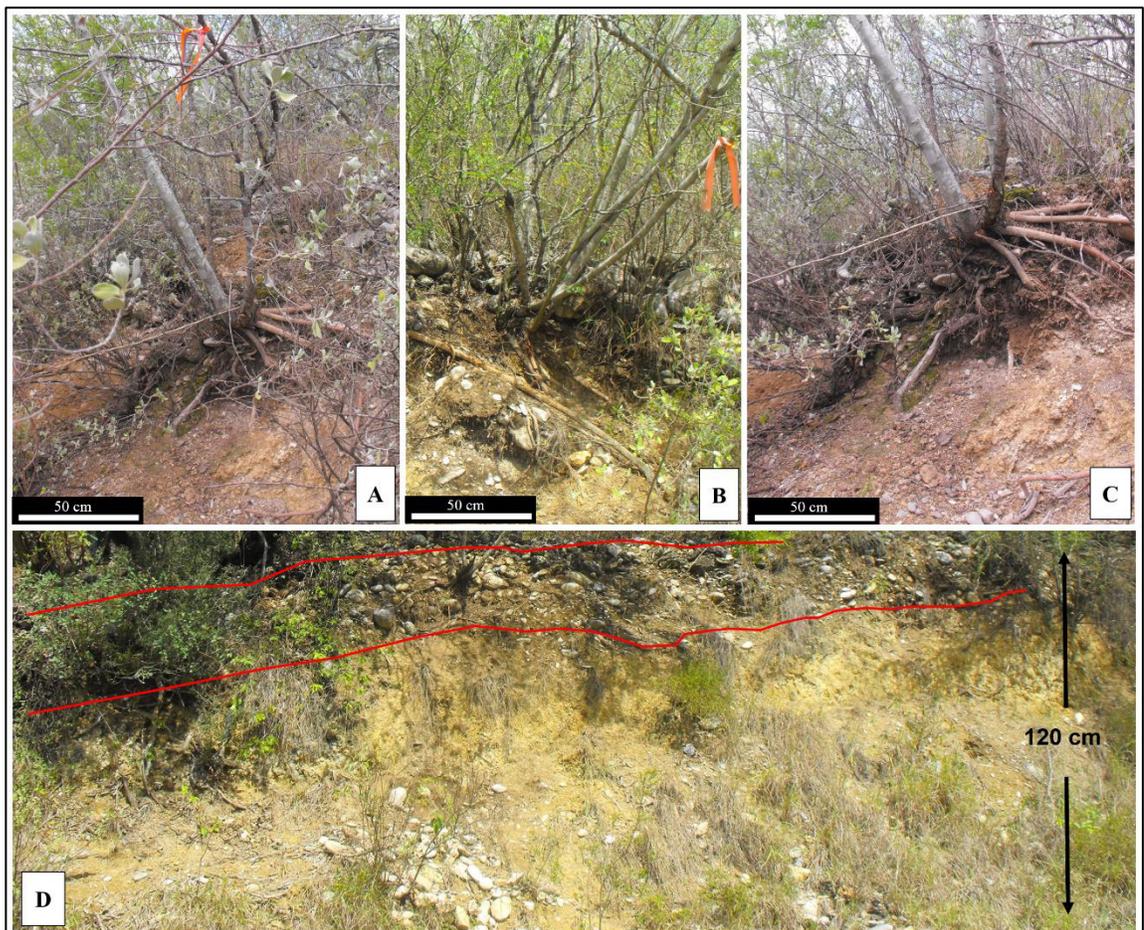


Figura 6 *Havardia pallens*. Individuos muestreados para pruebas (a, b, c) profundidad de suelo en el sitio (d).

2.-*Acacia farnesiana* (L.) Willd. Árbol o arbusto desde 3 hasta 8 m de altura y hasta 40 cm, de hojas perennifolia. Bosque tropical caducifolio y matorral xerófilo, Selva baja caducifolia y matorral espinoso. Utilizada para reforestación, así como también en el establecimiento de cercas vivas en sistemas agroforestales, o como barrera rompevientos (Cervantes, 1996); presenta propiedades idóneas para el mejoramiento de la fertilidad del suelo debido a su asociación con bacterias fijadoras de nitrógeno. Se adapta a suelos pobres y se considera útil para la estabilización de suelos degradados (Von Carlowitz, 1991); ampliamente utilizada para el control de la erosión del suelo y su conservación (Martínez, 1991) (Figura 7).

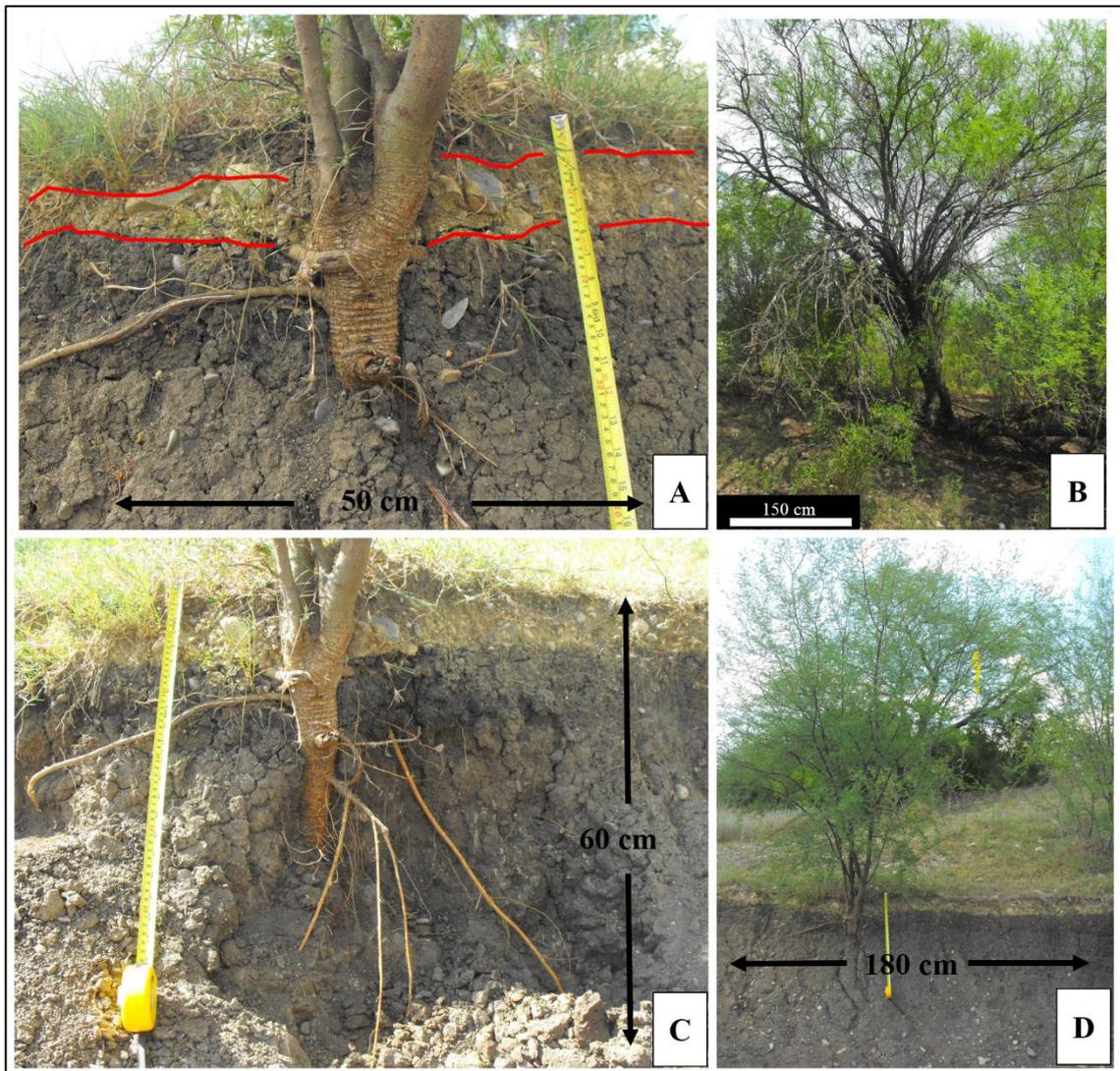


Figura 7 *Acacia farnesiana*. Individuos muestreados (a, b y d) y profundidades c.

3.-*Acacia rigidula* (benth): árbol de hoja perenne y de lento crecimiento. Puede llegar a medir a 15 pies de altura. Sus hojas son pequeñas y compuestas, brillante y de color verde oscuro (Figura 8). La corteza es delgada, color gris y con ramas extremadamente espinosas. Se distingue por flores amarillas claras, fragantes, en primavera. Requiere de poca humedad y prefiere un buen drenaje (Clement, 1998).

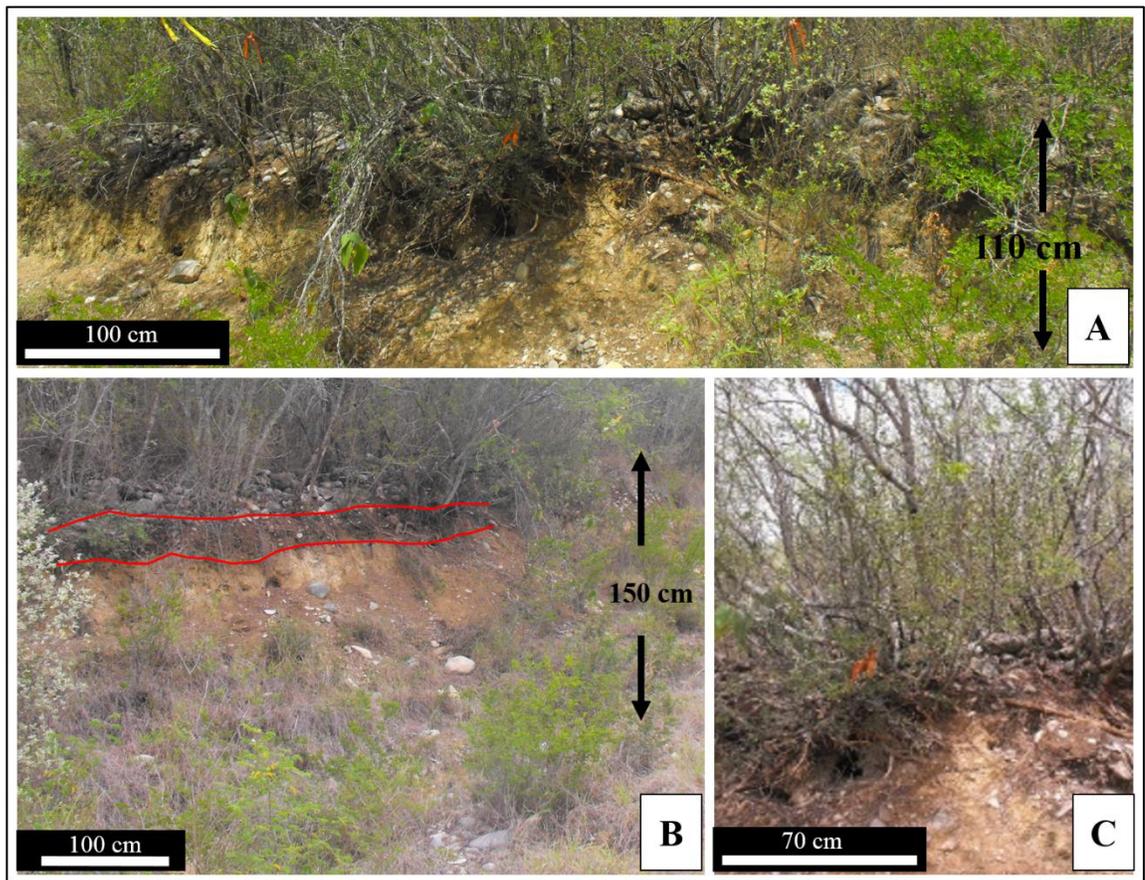


Figura 8 *Acacia rigidula*. Características del sitio de muestreo (a y b) e individuos muestreados (c).

4.-*Cordia boissieri* A. DC. Árbol subtropical de tronco ramificado corto, siempre verde de 182.4 a 364.8 centímetros de altura una copa en forma de corona un poco gris. Las hojas son verdes, grandes (7.7-12.7 de longitud y 7.7-10.2 de ancho), suaves, con terciopelo y cafés en la parte inferior. Las flores son

blancas-amarillas en forma de trompetas de 5.2 a 7.6 centímetros de diámetro y son producidas a lo largo del verano, especialmente después de las lluvias de abril a junio (Figura 9). El fruto blanquecino madura de julio a septiembre y es de 2.6 centímetros (Duran et al., 2003).

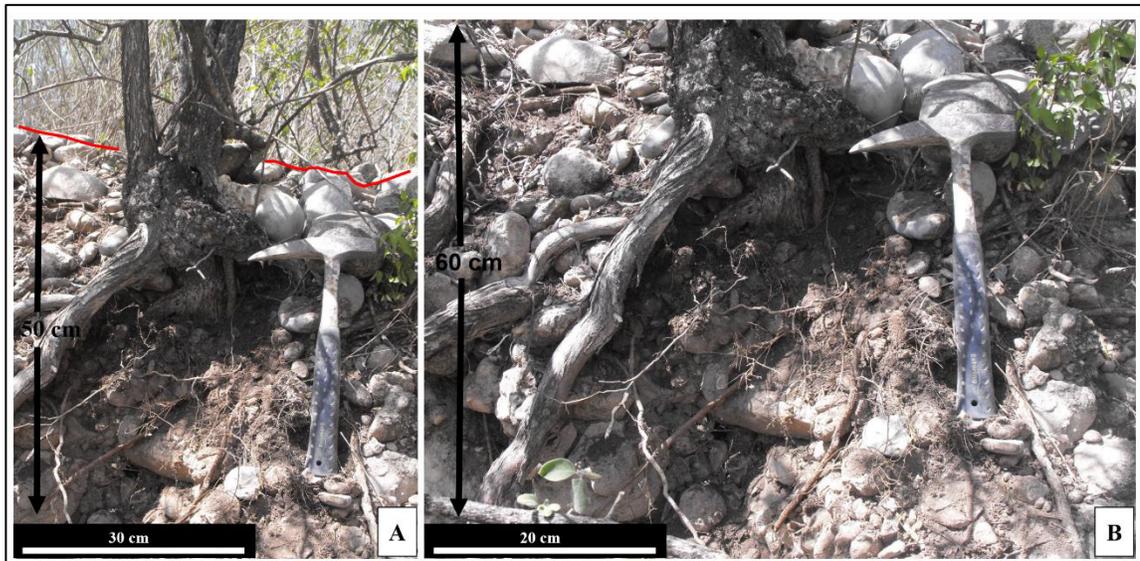


Figura 9 *Cordia boissieri*. Características del sitio e individuos muestreados (a y b).

5.- *Acacia berlandieri*. Es un arbusto nativo en el noreste de México y suroeste de Estados Unidos. Pertenece a la subfamilia Mimosoideae de Fabaceae. Crece de 1 a 5 metros de altura con flores esféricas y blancas, la temporada de floración es desde febrero hasta abril (Figura 10). Las flores de color blanco a crema (amarillentas con edad), crecen en forma de bolas, 5/8 pulgadas o más de diámetro, y son bastante fragantes. Las hojas son compuestas, semejantes a los helechos, de 13 a 20 cm de largo con 12 a 22 cm (a veces hasta 45 cm) pares de folíolos, y estos volantes se dividen de nuevo en 30-50 (Hatch et al., 1990). Se encuentra generalmente laderas del Noreste de México

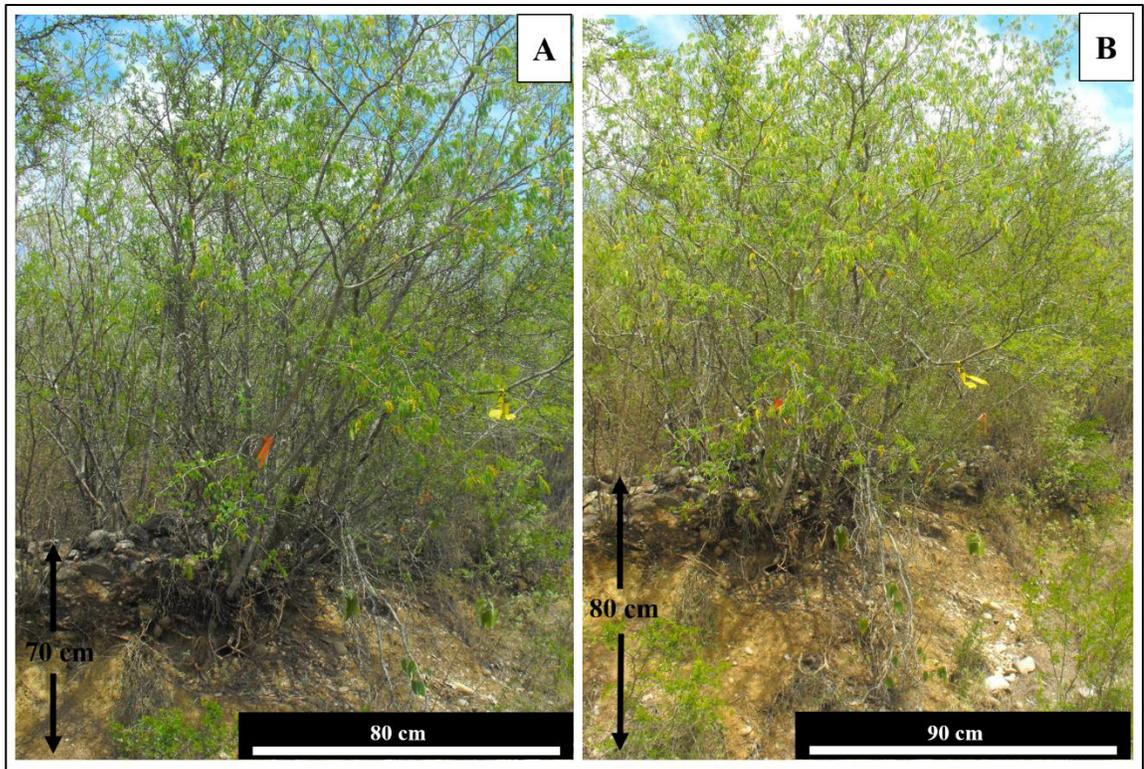


Figura 10 *Acacia berlandieri*. Características del sitio e individuos muestreados (a y b).

Sitio 2 Bosque Escuela

6. - *Arbutus xalapensis*: Crece como un árbol de hoja perenne. Arbusto que alcanza 20 o 30 pies (0,6-1,1 m) de altura Puede alcanzar 12 m de altura, 9.3 m (2.8 m) de circunferencia y 42 Pies (13 m) en la corona propagación en sitios favorable (Figura 11). La corteza más antigua es de color marrón oscuro, gris o negro. La corteza joven puede ser blanca, naranja, rosada, (Ramirez-Marcial, N. y Gonzalez-Espinosa, M. 1998)

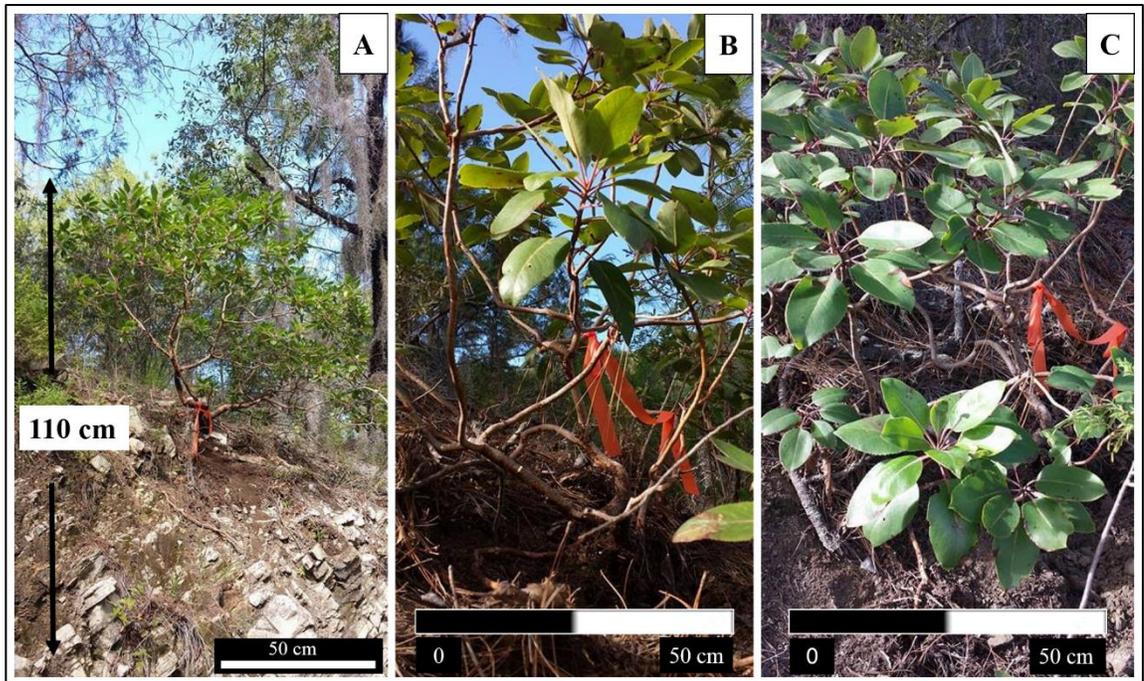


Figura 11 *Arbutus xalapensis*. Características del sitio e individuos muestreados (a, b y c).

7. - *Pinus pseudostrobus* Lindl: Se le conoce como pacingo y mocohtaj (lengua tojolobal), pino ortiguillo, pino blanco, pino triste, ocote, pino canís y pino real (Martínez, 1948; Martínez, 1979). Es una especie nativa perenne de México de la región Bosque Templado y en alturas de entre 1300 a 3250 m. Usualmente llegan a medir de 3-45 metros de altura, el tronco es recto y con diámetro de 40 a 80 cm (Figura12) (Farjon, 2013).

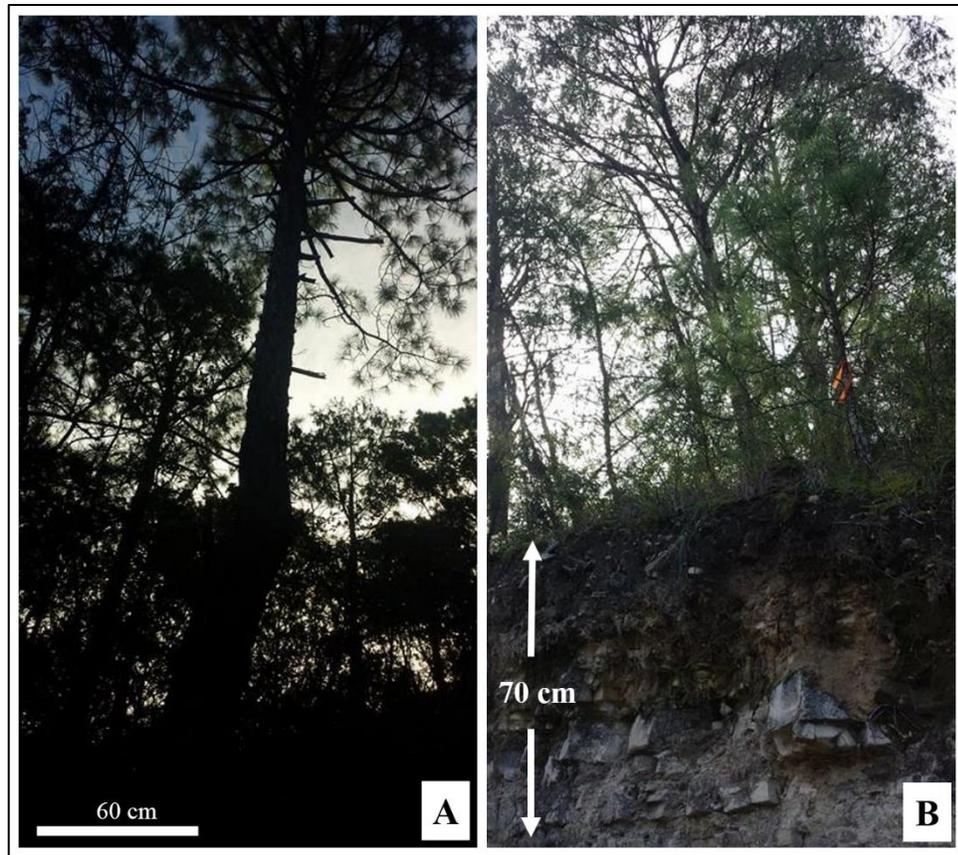


Figura 12 *Pinus pseudostrobus*. Características del sitio e individuos muestreados (a y b).

8. - *Quercus canbyi*: es una especie del género *Quercus* dentro de la familia de las *Fagaceae*. De hoja perenne, tiene forma piramidal en individuos jóvenes y una forma irregular en madurez. Normalmente alcanzará los 40 a 50 pies. Sus hojas son de 6 a 8 pulgadas de largo y 2 a 3 pulgadas de ancho con bordes oscuros y verde brillante. (Figura 13).

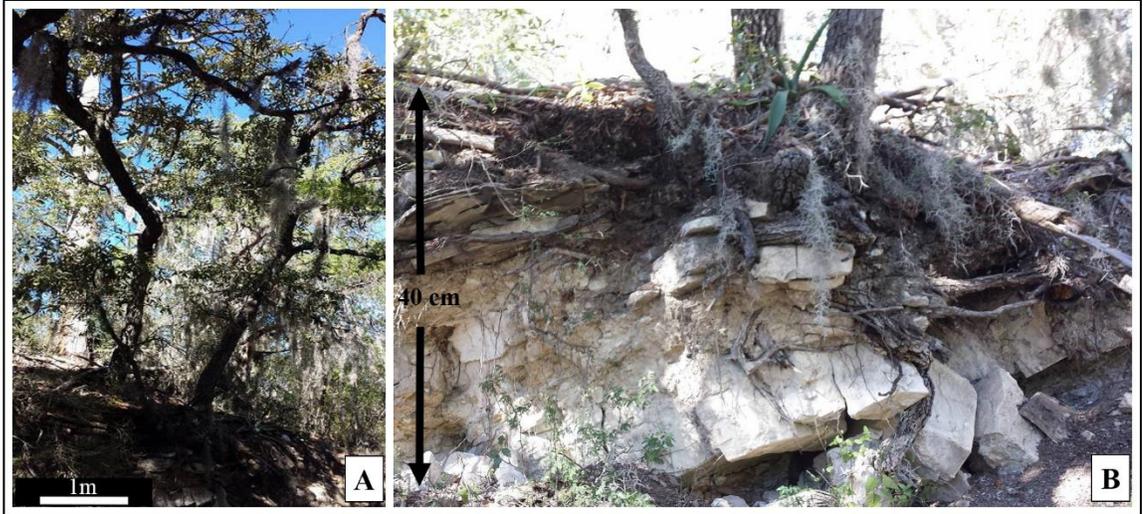


Figura 13 *Quercus canbyi*. Características del sitio e individuos muestreados (a y b).

9. - *Quercus polymorpha* Chamisso & Schiechtendal Linnæa, V. Nativa de México y el oeste de Texas. Este semi-árbol es de hoja perenne. Las hojas irregularmente lobuladas tienen color marrón rojizo (Trencheva et al., 2008) (Figura 14).



Figura 14 *Quercus polymorpha*. Características del sitio e individuos muestreados (a y b).

10. - *Quercus rysophylla*; árbol de hoja perenne de crecimiento rápido, que puede alcanzar los 25 m altura. Las hojas son alternas, simples, rígidas y elípticas de 7 a 25 cm de largo y entre 2 y 8 cm de ancho (Figura 15). Cuando las hojas llegan a madurar son lisas, brillantes y Color verde oscuro en la parte superior. Las bellotas son ovales y mucronadas. Su longitud es de 1 a 1.7 cm, solos o en pares, sésiles. La cúpula, de color dorado cuando es joven, (Nixon, K. et al. 1998). Esta especie es endémica de México y se encuentra principalmente en las Sierra Madre Oriental.



Figura 15 *Quercus rysophylla*. Características del sitio e individuos muestreados.

3.4 Preparación de muestras de raíz para su análisis

Se extrajeron 50 muestras de raíces de cada especie con sistema radicular expuesto (figura16), esto con el fin de causar el mínimo cambio en la zona. Se cortaron y empacaron cuidadosamente en bolsas de papel (Figura 17) y fueron transportadas en contenedores (hieleras) al Laboratorio de Suelos y Nutrición de Bosques de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

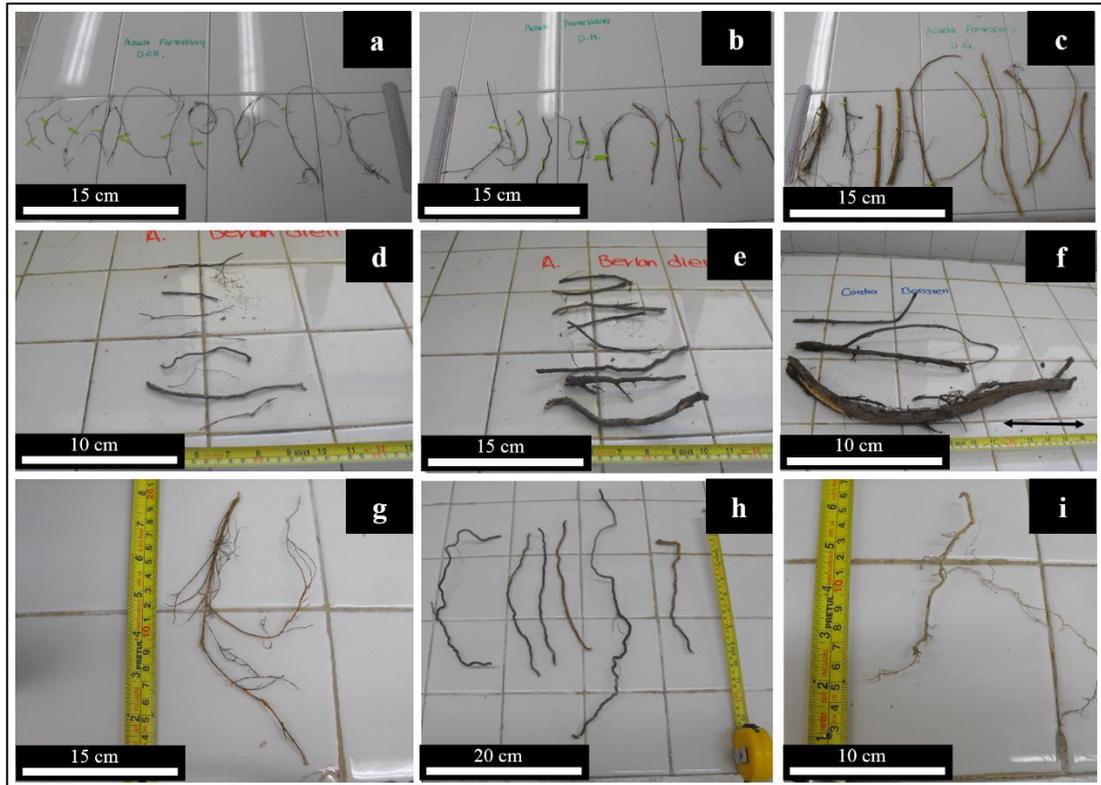


Figura 16 muestras de raíces de cada especie



Figura 17 Empaquetado por clasificación diamétrica

En laboratorio, las raíces dañadas fueron desechadas y las muestras de raíz fueron clasificadas por diámetro: de 1 a 3 mm de 3 a 6 mm y de 6 a 10 mm. Fueron cortadas en aproximadamente 10 cm (Figura 18).



Figura 18 Muestras de categoría diámetrica III (6 a 10 mm) de *Havardia pallens*.

3.5 Pruebas de fuerza máxima de quiebre

Los ensayos se realizaron utilizando la máquina de ensayo Universal Shimadzu tipo SLFL-100kN siguiendo el siguiente procedimiento: Las muestras de raíces fueron cuidadosamente colocadas y se sujetaron al dispositivo en ambas extremidades (Figura 19). Previo a esto, las raíces fueron clasificadas por diámetros y con una longitud de 10 mm. Después de que la muestra de raíz se fija en el dispositivo el experimento se llevó a cabo a una velocidad constante de 10 mm/min. Los valores de resistencia al quiebre fueron graficados por el software Trapezium (Figura 20).

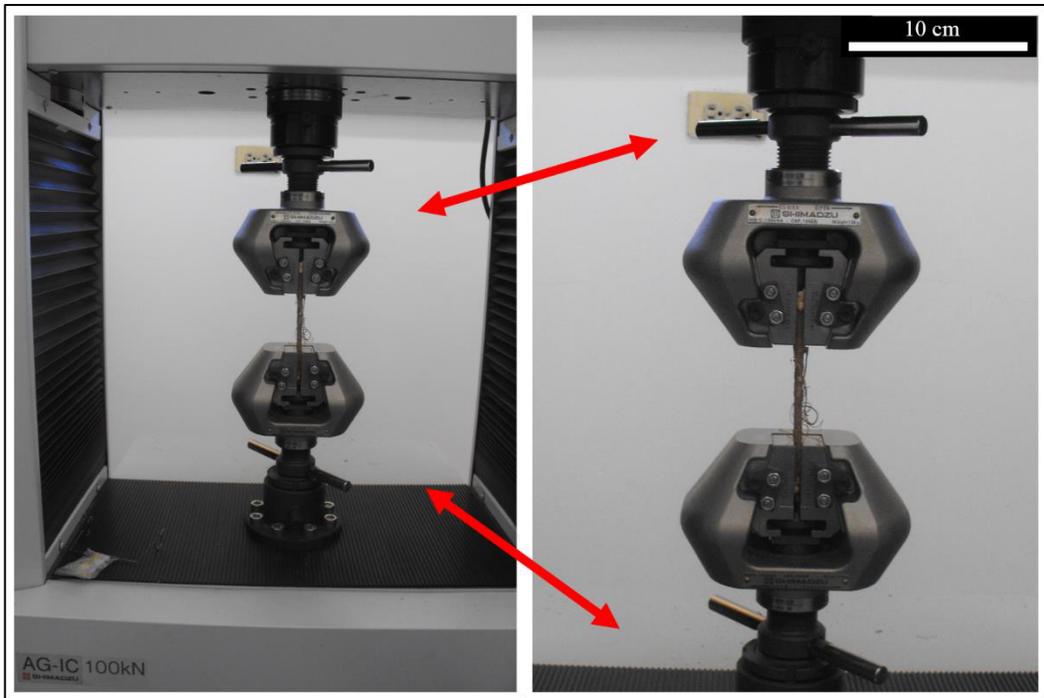


Figura 19 Posicionamiento de raíces en la Universal Shimadzu tipo SLFL-100kN

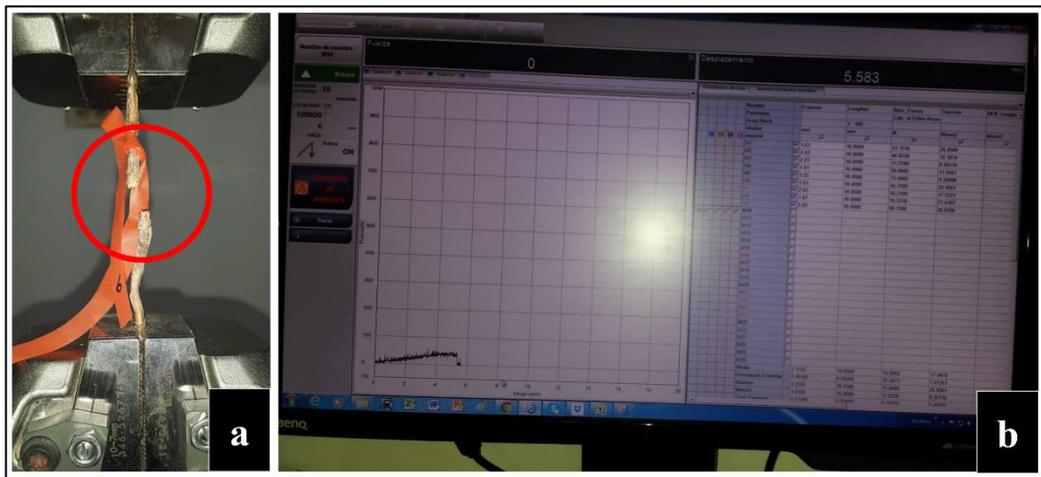


Figura 20 Test finalizado correctamente (a) y grafico generado en el software Trapezium (b).

3.6 Análisis estadístico

Los resultados obtenidos por el Software Trapezium X (Materials Testing Software), de fuerza máxima de quiebre, fueron analizados utilizando el programa estadístico de Ciencias Sociales (SPSS) versión estándar 13.0 para Windows (SPSS Inc., Chicago, IL). La variable fuerza máxima de quiebre fue sometida a la prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov para comprobar sus supuestos de normalidad. Dado que los datos no cumplieron supuestos de la distribución normal, los datos fueron transformados a Log N con el fin de cumplir con dichos supuestos de normalidad. Posterior a ello se realizó el Análisis de Varianza.

El análisis de varianza (ANOVA) se utilizó para comprobar las diferencias en diámetro de raíz y fuerza máxima de quiebre (fuerza de corte) y la interacción entre ellos para las 10 especies. Así mismo, también se hicieron comparaciones de medias mediante la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). La variable fuerza de tensión fue sometida a la prueba de normalidad Shapiro Wilk y Kolmogorov-Smirnov para comprobar su normalidad. Sin cumplir con supuestos de normalidad se optó por usar la prueba no paramétrica de U Mann-Whitney sin corrección para $p \leq 0.05$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Fuerza máxima de quiebre de especies en Matorral Espinoso Tamaulipeco y Bosque de Pino-Encino.

4.1.1 Análisis de varianza.

El ANOVA realizado mostró diferencias significativas ($p \leq 0.05$) para las especies, diámetros y su interacción (Tabla 1).

Tabla 1. ANOVA factorial de dos vías, especies y diámetros.

Fuente de variación	F	Sig.
Especie	29.69	0.000
Diámetro	277.83	0.000
Especie *	5.41	0.000
Diámetro		
R ajustada		0.752

Se encontraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$), en las especies de *H. pallens*, *A. farnesiana*, *A. rigidula*, *A. berlandieri*, *A. xalapensis*, *P. pseudostrobus*, *Q. canbyi*, *Q. rysophylla*, *Quercus polymorpha* entre los diferentes diámetros (Tabla 2). La especie *C. boissieri* fue la única especie que no presentó diferencias significativas en la fuerza máxima de quiebre medida.

Tabla 2 Valores de Tukey ($p \leq 0.05$) para el diámetro de las especies. Valores en negrita indican diferencias significativas.

Especies	F	Sig
<i>A. rigidula</i>	4.51	0.020
<i>H. pallens</i>	18.70	0.000
<i>C. boissieri</i>	2.68	0.090
<i>A. farnesiana</i>	49.32	0.000
<i>A. berlandieri</i>	16.74	0.000
<i>A. xalapensis</i>	83.23	0.000
<i>P. pseudostrobus</i>	92.00	0.000
<i>Q. canbyi</i>	110.60	0.000
<i>Q. polymorpha</i>	86.13	0.000
<i>Q. rysophylla</i>	108.12	0.000

Así mismo se obtuvieron resultados de subconjuntos en cada una de las tres categorías diamétricas con una N de 100 (Tabla 3).

Tabla 3 Valores de Categorías diamétricas y subconjuntos

Categoría Diamétrica	N	Subconjunto		
		1A	2B	3C
CI	100	3.95		
CII	100		4.72	
CII	100			5.76
Sig.		1.00	1.00	1.00

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos, basados en las medias observadas de los datos de fuerza máxima de quiebre (N). El término de error hace referencia a la media cuadrática. (Figura 21).

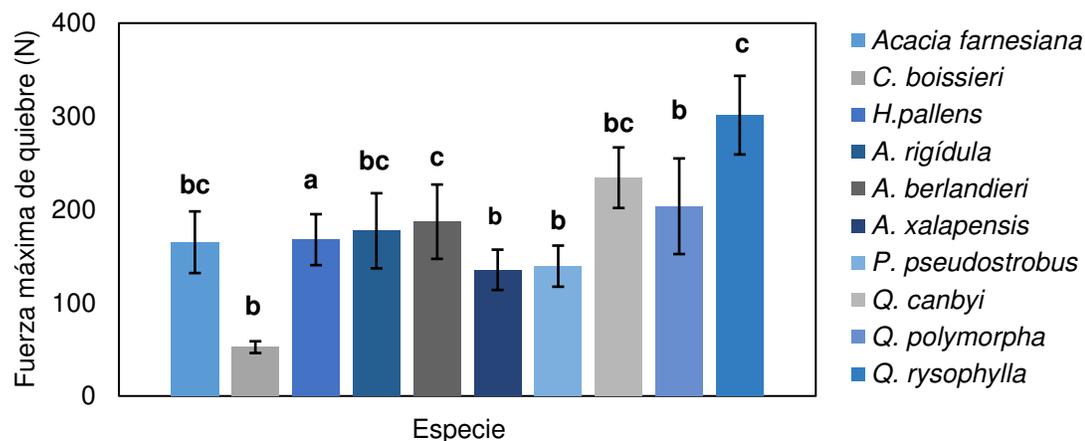


Figura 21 Medias de fuerza máxima de quiebre, con su respectivo error estándar por especie.

Las categorías diamétricas guardan relación con la especie y con las respectivas medias de fuerza máxima de quiebre, observándose en la especie

Q. polymorpha un mayor rango de fuerza a través de sus categorías diamétricas (Figura 22).

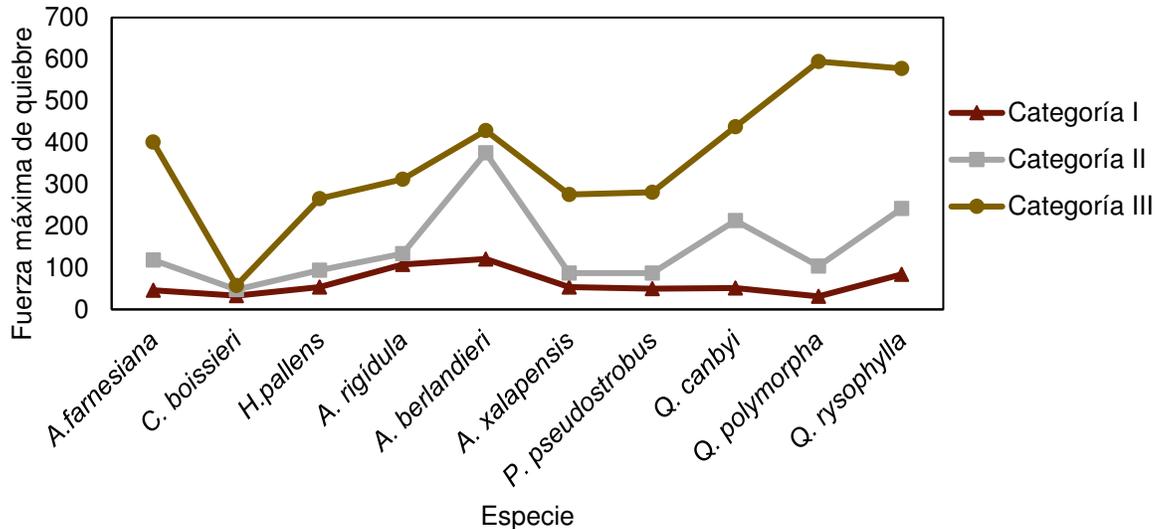


Figura 22 Sp MET. *A. farnesiana*, *C. boissieri*, *H. pallens*, *A. rigidula*, *A. berlandieri*, Sp Bosque Pino- Encino *A. xalapensis*, *P. pseudostrobus*, *Q. canbyi*, *Q. polymorpha*, *Q. rysophylla*.

Como se puede observar la fuerza máxima de quiebre en todas las especies aumenta con el diámetro, resultado que concuerda con lo presentado por Genet et al. (2005) en las especies *Pinus pinaster* y *Castanea sativa*.

4.1.2 Diámetros de raíz y Fuerza máxima de quiebre.

Los ensayos de fuerza máxima de quiebre se llevaron a cabo con éxito en 30 muestras de raíz de cada una de las especies excepto por *Q. polymorpha* que incluyó 20. Los promedios de diámetros por especies fueron los siguientes: *A. farnesiana* 3.98 mm *C. boissieri* 4.76 mm, *H. pallens* 5.29 mm, *A. rigidula* 4.23 mm, *A.berlandieri* 3.88 mm, *A. xalapensis* 4.37 mm, *P. pseudostrobus* 4.62 mm, *Q. canbyi* 4.64 mm, *Q. polymorpha* 4.17 mm, *Q. rysophylla* 4.54 mm.

La fuerza máxima de quiebre por especie (N) varió de la siguiente manera: *A. farnesiana* de 18.75 N a 743.75 N, *C. boissieri* de 15.63 N a 128.13 N, *H. pallens* 25 N a 500 N, *A. rigídula* de 34.37 N a 971.88 N, *A.berlandieri* de 25 N a 809.38 N, *A. xalapensis* de 37.50 N a 475 N, *P. pseudoastrobus* de 31.25 N a 465.63 N, *Q. canbyi* de 21.87 N a 606.25 N, *Q. polymorpha* de 18.75 N a 996.88 N, *Q. rysophylla* de 56.25 N a 975 N.

Considerando la media de los valores de fuerza máxima de quiebre obtenidos en las diez especies analizadas el valor mínimo fue observado en *C. boissieri* (46.04 N) y el máximo en *Q. polymorpha* (301.25 N). Los valores mínimos, máximos y medios obtenidos por especie pueden observarse en la Tabla 4.

Tabla 4. Valores mínimos, máximos y media para los valores de las especies analizadas.

Especie	F _{max} (N)		
	Max.	Min.	Media
<i>A.farnesiana</i>	743.75	18.75	164.93
<i>C.boissieri</i>	128.13	15.63	46.04
<i>H. pallens</i>	500.00	25.00	137.93
<i>A. rigídula</i>	971.875	34.37	180.06
<i>A.berlandieri</i>	809.375	25.00	290.00
<i>A. xalapensis</i>	475.00	37.50	138.95
<i>P. pseudoastrobus</i>	465.625	31.25	139.27
<i>Q. canbyi</i>	606.25	21.87	234.17
<i>Q. polymorpha</i>	996.88	18.75	218.08
<i>Q. rysophylla</i>	975.00	56.25	301.25

La relación entre el diámetro de la raíz y fuerza máxima de quiebre mostró una relación positiva en todas las especies (Figura 23, 24 y 25). Las curvas de regresión (ecuación de ley de potencia) ajustadas a los datos experimentales se muestran a continuación: *A. farnesiana* ($y = 61.627x^{-80.32}$ $R^2 = 0.7689$) *C. boissieri* ($y=7.4539x^{16.915}$ $R^2 = 0.5706$), *H. pallens* ($y =43.087x^{-60.233}$ $R^2 = 0.6529$), *A. rigídula* ($y = 50.54x^{-35.601}$ $R^2 = 0.4664$), *A.berlandieri* ($y = 81.79x^{-70.29}$ $R^2 = 0.8565$), *A. xalapensis* ($y = 49.39x^{-80.678}$ $R^2 = 0.8828$), *P. pseudoastrobus* ($y = 45.084x^{-69.045}$ $R^2 = 0.8838$), *Q. canbyi* ($y = 72.172x^{-100.4}$ $R^2 =$

= 0.9108), *Q. polymorpha* ($y = 132.64 x^{-269.29}$ $R^2 = 0.7226$), *Q. rysophylla* ($y = 90.513 x^{-109.38}$ $R^2 0.9227$).

Los resultados obtenidos en fuerza máxima de quiebre, confirman que, raíces con diámetros mayores requieren de una fuerza mayor para romperse.

En los resultados de este estudio se puede observar que *C. boissiei* y *A. rigidula* muestran valores bajos de R^2 , 0.57 y 0.46 respectivamente, que concuerda con los resultados de Nilaweera (1994) quién en su estudio de correlación entre el diámetro de la raíz y la fuerza de tensión informa que la (R^2) entre el diámetro de la raíz y la fuerza de tensión de las raíces es media (0.40).

Este resultado es comparable con el estudio de Bischetti et al. (2005) para la especie *Alnus viridis* con R^2 de 0.34. Aunque el valor de R^2 parece bajo esto podría ser debido al bajo número de las pruebas.

Stokes et al., (1996) demostraron que las magnitudes de estos son a menudo controladas por el sitio de ubicación del espécimen (geología, topografía, tipo y profundidad del suelo, clima, densidad del terreno y edad del árbol).

En el caso particular de *C. boissieri*, la pedregosidad en el suelo jugó un papel importante y atendió factores en la morfología de las raíces.

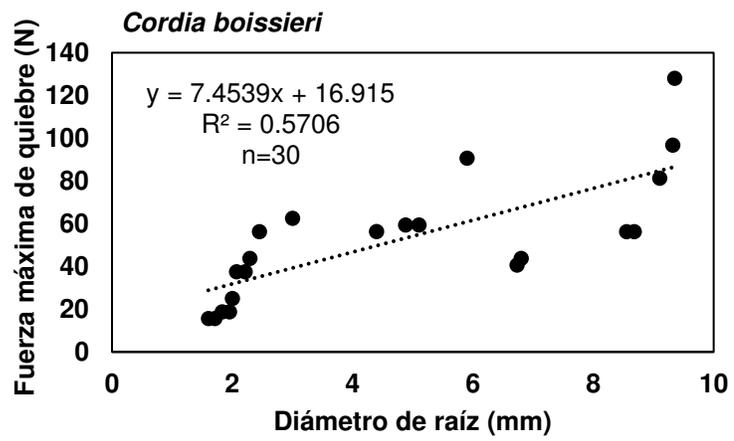
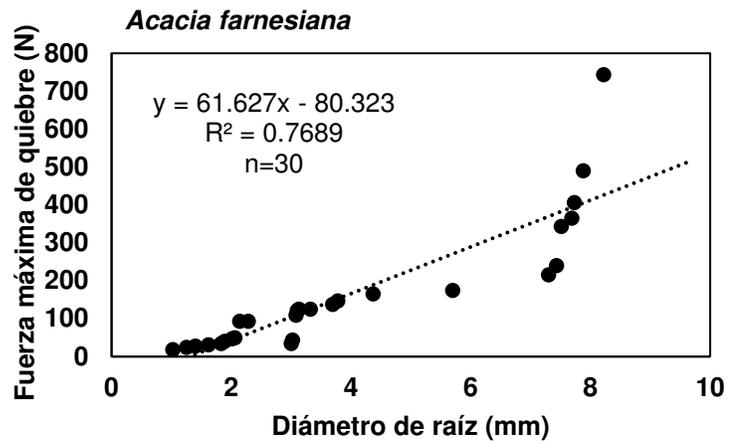


Figura 23 Relación positiva entre fuerza máxima de quiebre y el diámetro de raíz.

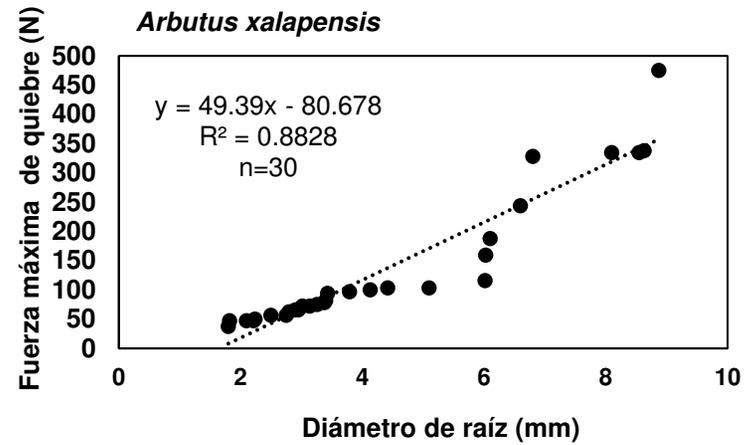
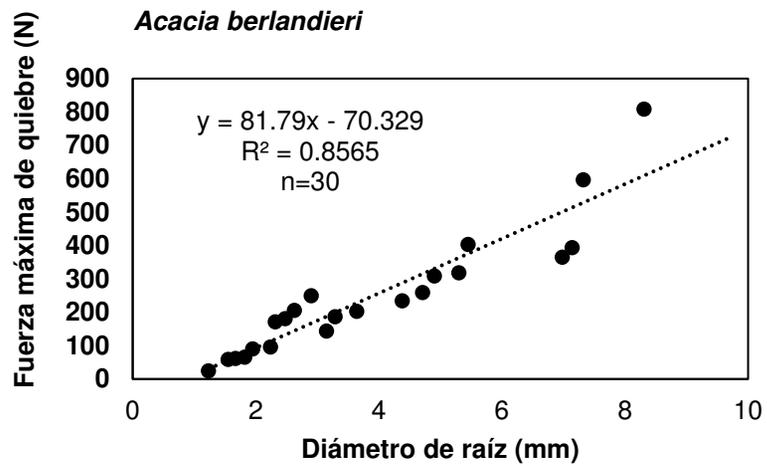
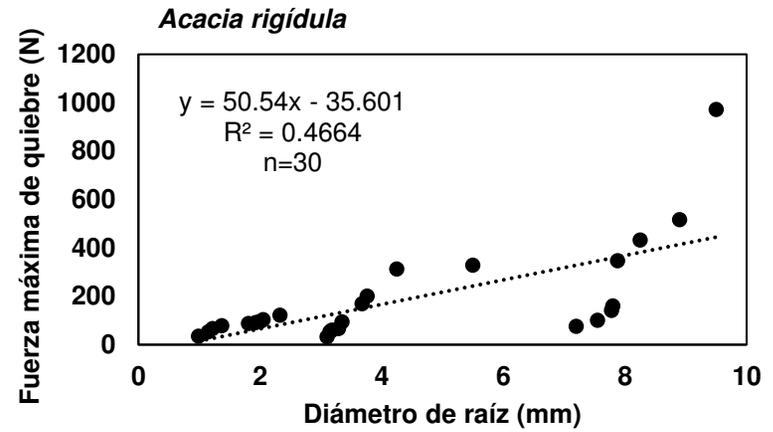
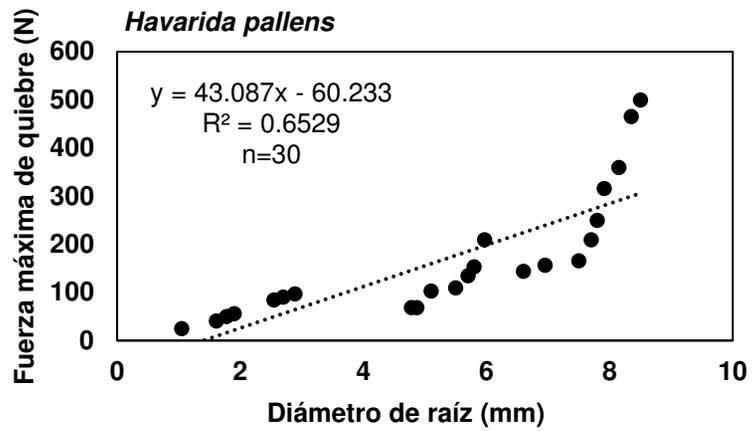


Figura 24 Relación positiva entre fuerza máxima de quiebre y el diámetro de raíz.

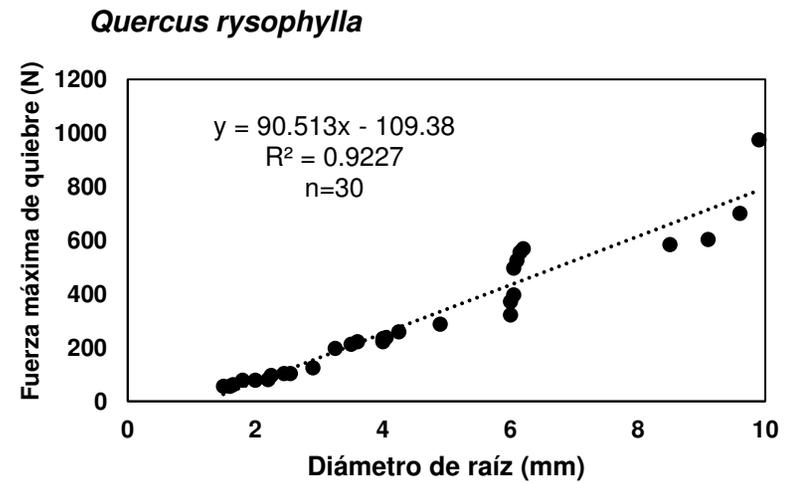
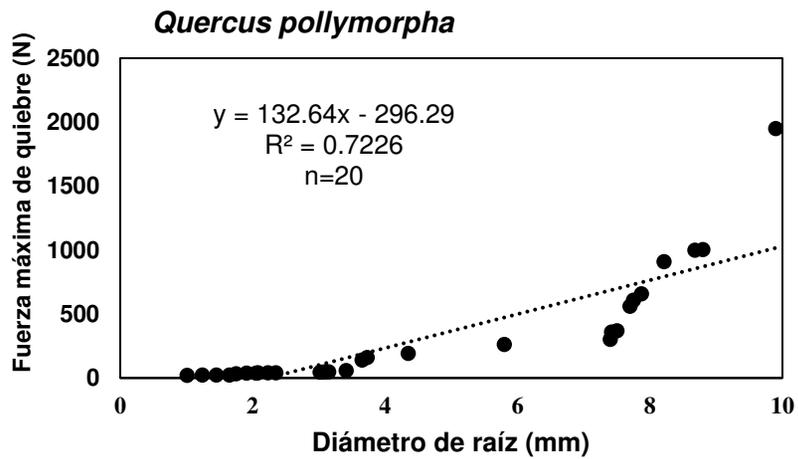
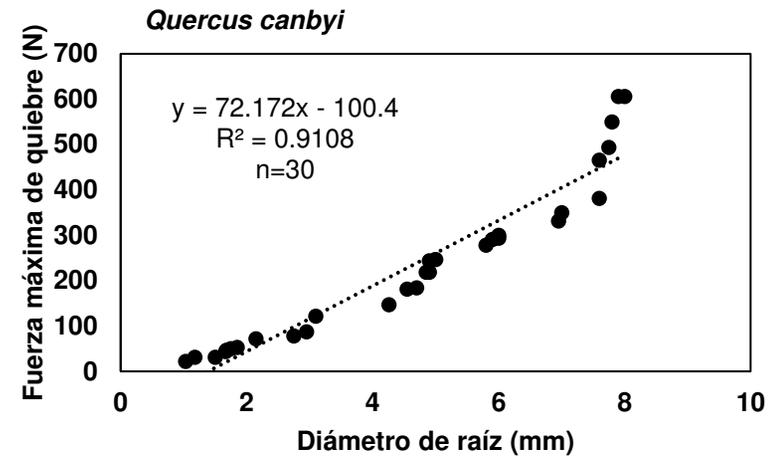
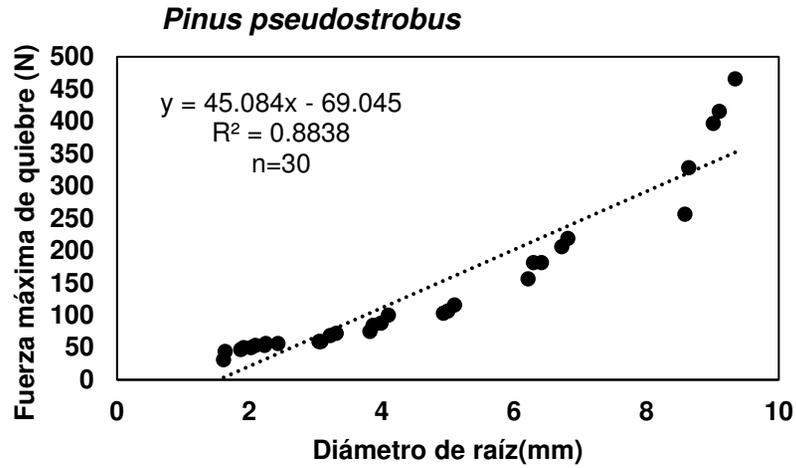


Figura 25 Relación positiva entre fuerza máxima de quiebre y el diámetro de raíz.

Los valores promedio de fuerza máxima de quiebre de las especies analizadas, se presentaron en el siguiente orden: *C. boissieri* < *H.pallens* < *A. xalapensis* < *P. pseudostrobus* < *A. farnesiana* < *A. rígida* < *Q. polymorpha* < *Q. canbyi* < *A. berlandieri* < *Q. rysophylla*.

La fuerza máxima de quiebre calculada para las raíces de las especies de Matorral Espinoso Tamaulipeco, fluctuó por categoría diamétrica en valores de 33.12 N para *C. boissieri* en diámetros 0-3 mm. (Categoría I) a 428.65 N en la especie *A. berlandieri* en diámetro de 6-10 mm. (Categoría III) Presentándose la fuerza máxima de quiebre de las especies analizadas de manera ascendente *C. boissieri* < *H. pallens* < *A. rígida* < *A. farnesiana* < *A. berlandieri*. (Figura 28).

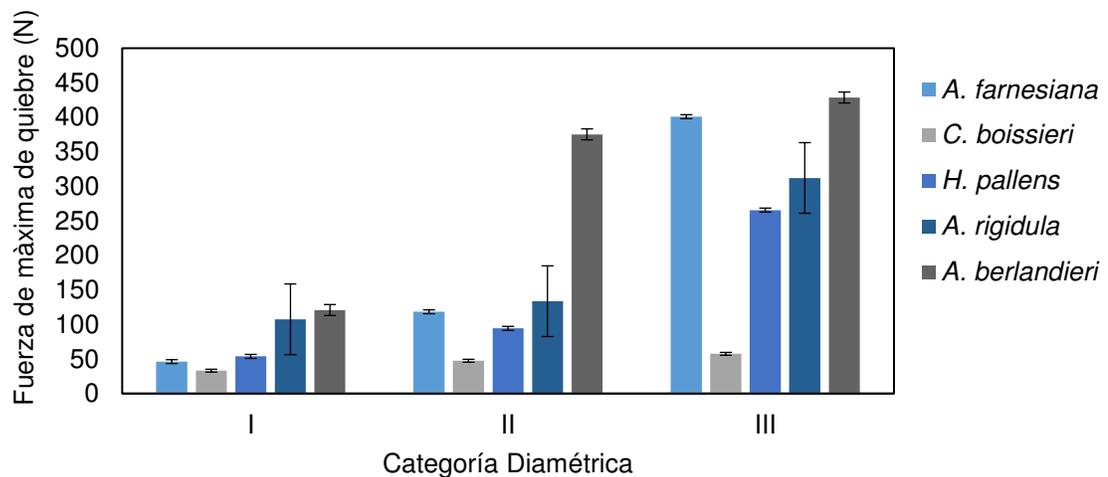


Figura 26 Valores promedio de fuerza máxima de quiebre por categoría de diámetro de la raíz para especies del Matorral Espinoso Tamaulipeco.

La fuerza de quiebre calculada para las raíces de las especies del Bosque de Pino-Encino, fluctuó en valores de 31.25 N para *Q. polymorpha* en diámetros 0-3 mm (Categoría I) a 594.53 N en la especie *Q. polymorpha* en diámetro de 6-10 mm (Categoría II). Presentando fuerza de quiebre de las especies analizadas de manera ascendente *Arbutus xalapensis* < *Pinus pseudostrobus* < *Quercus canbyi* < *Quercus polymorpha* < *Quercus rysophylla*. (Figura 27).

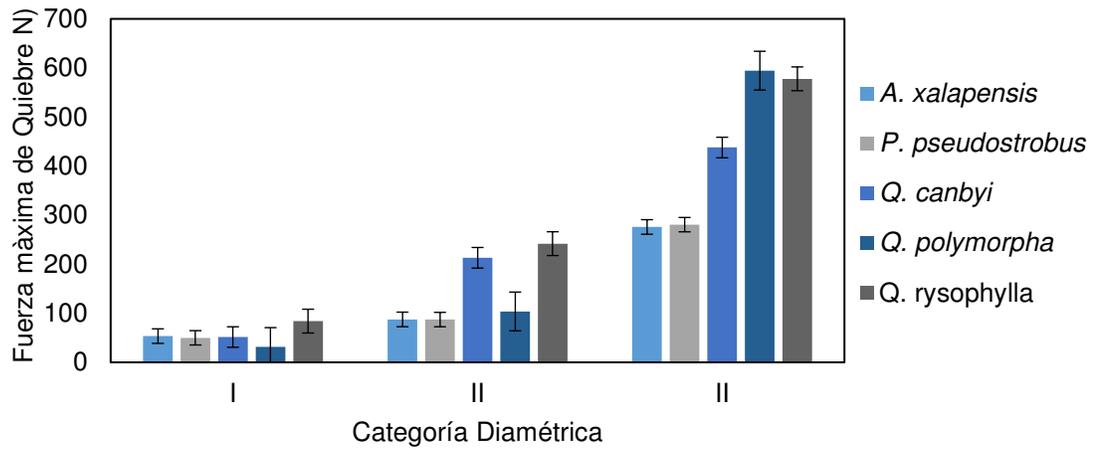


Figura 27 Valores de fuerza de quiebre por categoría de diámetro para especies del Bosque de Pino-Encino.

Sin embargo, de las 10 especies analizadas, la fuerza de quiebre fluctuó en valores de 31.25 N para *Quercus polymorpha* en diámetros 0-3 mm (Categoría I) a 594.53 N en la especie *Quercus polymorpha* en diámetro de 6-10 mm (Categoría II) ambos valores de una especie del Bosque de Pino-Encino (Figura 28).

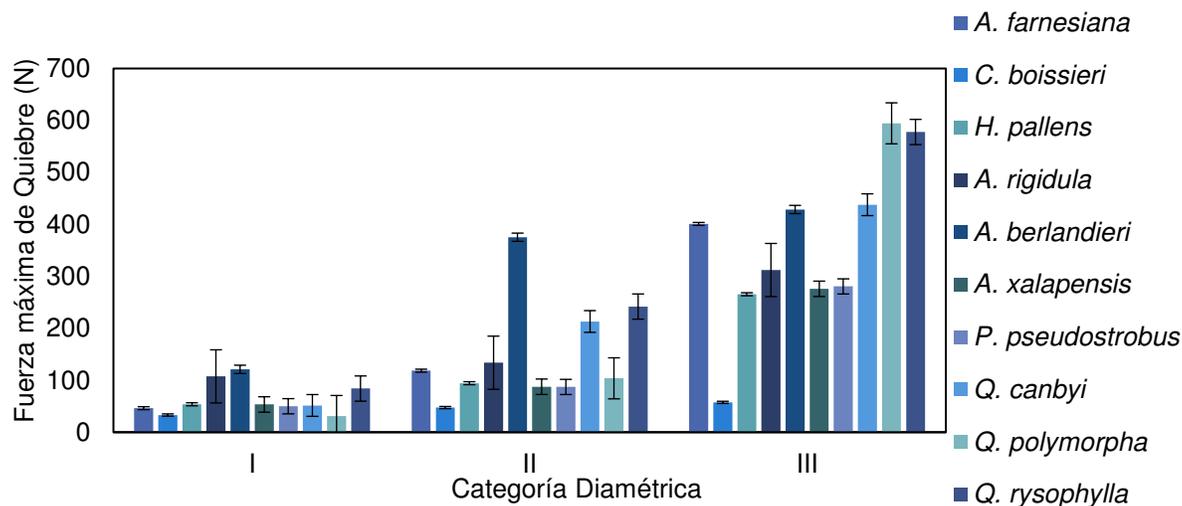


Figura 28 Valores de fuerza máxima de quiebre por categoría de diámetro para especies del MET y del Bosque de Pino-Encino.

Las diez especies analizadas se presentaron de la siguiente forma ascendente en relación con su fuerza máxima de quiebre: *C. boissieri* < *H. pallens* < *A. xalapensis* < *P. pseudostrobus* < *A. rigidula* < *A. farnesiana* < *Q. canbyi* < *Q. polymorpha* < *A. berlandieri* < *Q. rysophylla*. (Tabla 5)

Tabla 5. Valores medios para cada una de las categorías diamétricas, así como el promedio de valores entre ellas.

	F_{max} (N)			
<i>C.boissieri</i>	33.13	47.5	57.5	46.04
<i>H. pallens</i>	53.782	94.38	265.63	137.93
<i>A. xalapensis</i>	53.44	87.5	275.94	138.96
<i>P. pseudostrobus</i>	50.00	87.19	280.63	139.27
<i>A. rígídula</i>	107.5	133.75	312.15	184.47
<i>A.farnesiana</i>	46.25	118.44	400.89	188.53
<i>Q. canbyi</i>	51.56	213.13	437.81	234.17
<i>Q. polymorpha</i>	31.25	103.75	594.53	243.18
<i>Q. rysophylla</i>	84.06	241.88	577.81	301.25
<i>A.berlandieri</i>	120.94	375.31	428.65	308.3

4.2 Fuerza de Tensión (T_s) de Especies de Matorral Espinoso Tamaulipeco y Bosque de Pino- Encino.

4.2.1 Prueba U de Mann-Whitney.

La variable fuerza de tensión fue sometida a la prueba U Mann-Whitney sin corrección para $p \leq 0.05$ mostrando diferencias estadísticas significativas entre *A. farnesiana* y *Q. canbyi*; *A. farnesiana* y *Q. rysophylla*; *C. boissieri* y *A. xalapensis*; *C. boissieri* y *Q. canbyi*; *C. boissieri* y *Q. rysophylla*; *H. pallens* y *P. pseudostrobus*; *H. pallens* y *Q. canbyi*; *H. pallens* y *Q. rysophylla*; *A. rigidula* y *A. berlandieri*; *A. rigidula* y *Q. canbyi*; *A. rigidula* y *Q. rysophylla*; *A. berlandieri* y *H. pallens*; *A. berlandieri* y *P. pseudostrobus*; *A. berlandieri* y *Q. canbyi*; *A. berlandieri* y *Q. rysophylla*; *A. xalapensis* y *Q. canbyi*; *A. xalapensis* y *Q. rysophylla*; *P. pseudostrobus* y *A. farnesiana*; *P. pseudostrobus* y *Q. canbyi*; *P. pseudostrobus* y *Q. rysophylla*; *Q. canbyi* y *Q. polymorpha*; *Q. canbyi* y *Q. rysophylla*. Y Mostrando también diferencias significativas en la variable diámetro entre las especies (Tabla 6).

Tabla 6 Diferencias estadísticas entre interacción especies - diámetro de raíz.

Tabla 6: Valores P de la prueba U de Mann Whitney U			
Especie	Vs	Diámetro	Ts
<i>A. farnesiana</i>	<i>Q. canbyi</i>	0.01	0.00
	<i>Q. rysophylla</i>	0.04	0.55
<i>C. boissieri</i>	<i>A. xalapensis</i>	0.63	0.04
	<i>Q. canbyi</i>	0.01	0.13
	<i>Q. rysophylla</i>	0.00	0.80
<i>H. pallens</i>	<i>P. pseudostrobus</i>	0.015	0.19
	<i>Q. canbyi</i>	0.14	0.00
	<i>Q. rysophylla</i>	0.02	0.03
<i>A. rigidula</i>	<i>A.berlandieri</i>	0.03	0.28
	<i>Q. canbyi</i>	0.02	0.00
	<i>Q. rysophylla</i>	0.00	0.08
<i>A. berlandieri</i>	<i>H. pallens</i>	0.00	0.10
	<i>P. pseudostrobus</i>	0.73	0.37
	<i>Q. canbyi</i>	0.00	0.00
	<i>Q. rysophylla</i>	0.00	0.35
<i>A. xalapensis</i>	<i>Q. canbyi</i>	0.04	0.00
	<i>Q. rysophylla</i>	0.01	0.17
<i>P. pseudostrobus</i>	<i>A. farnesiana</i>	0.14	0.04
	<i>Q. canbyi</i>	0.00	0.00
	<i>Q. rysophylla</i>	0.00	0.04
<i>Q. canbyi</i>	<i>Q. polymorpha</i>	0.14	0.01
	<i>Q. rysophylla</i>	0.41	0.00

*Si los valores de p son ≤ 0.05 , la interacción es declarada con diferencias significativas

4.2.2 Diámetro de raíz y fuerza de Tensión (T_s)

El número de muestras exitosas incluyeron 30 exámenes por especie, excepto por *Q. polymorpha* que incluyó 20. Los exámenes de fuerza máxima de quiebre y fuerza de tensión fueron exitosos en un 60 % del total de las muestras (50 pruebas). El remanente del 40% fallido se atribuye a pruebas descartadas por quiebre en extremos o por corteza desplazada.

Los valores mínimos y máximos de fuerza de tensión variaron de 1.86 N mm⁻² en *C. boissieri* a 44.65 en *A. rígida*. Las variaciones de fuerza de tensión (T_s) se mostraron según lo observado en la tabla 7.

Tabla 7 Máximo, mínimo y media de Fuerza de Tensión en las especies estudiadas

Especie	T _s (N/mm ²)		
	Max.	Min.	Media
<i>C.boissieri</i>	7.77	1.86	4.45
<i>A. xalapensis</i>	14.73	7.68	9.07
<i>P. pseudostrobus</i>	15.34	6.79	9.24
<i>H. pallens</i>	28.87	8.81	10.03
<i>Q. polymorpha</i>	23.4	16.84	11.34
<i>A.farnesiana</i>	22.94	14.01	12.43
<i>Q. Canbyi</i>	26.25	12.06	14.07
<i>Q. rysophylla</i>	31.83	12.66	19.27
<i>A. rígida</i>	44.65	13.71	20.54
<i>A.berlandieri</i>	21.03	14.92	22.12

Considerando el promedio de todos los valores de Fuerza de tensión obtenidos, las 10 especies analizadas fluctuaron entre 4.45 N mm⁻² en *C. boissieri* a 22.12 N mm⁻² en *A. berlandieri*. Las especies se ordenan de manera acescente tomando en cuenta su promedio de Fuerza te Tensión *C.boissieri*<*A. xalapensis*<*P. pseudostrobus*<*H.pallens*<*Q. polymorpha*<*A. farnesiana*<*Q. canbyi*<*Q. rysopylla*<*A. rígida*<*A berlandieri*.

La relación entre el diámetro de la raíz y los T_s se muestra en las figuras 29, 30 y 31. La relación obtenida entre el diámetro y T_s es negativa y podría compararse con una ecuación de ley de potencia. *A. farnesiana* ($y = 18.883x^{-0.32}$ R² = 0.5619), *C. boissieri* ($y = 21.596x^{-1.387}$ R² = 0.7769), *H. pallens* ($y = 26.199x^{-0.9}$ R² = 0.732), *A. rígida* ($y = 52.942x^{-1.129}$ R² = 0.5714), *A. berlandieri* ($y = 35.851x^{-0.412}$ R² = 0.606), *A.s xalapensis* ($y = 18.677x^{-0.565}$ R² = 0.693), *P. s pseudostrobus* ($y = 22.275x^{-0.714}$ R² = 0.8105), *Q. canbyi* ($y = 25.443x^{-0.475}$ R² = 0.8489), *Q. polymorpha* ($y = 14.588x^{-0.442}$ R² = 0.4405) y *Q. rysophylla* ($y = 37.93x^{-0.532}$ R² = 0.8205).

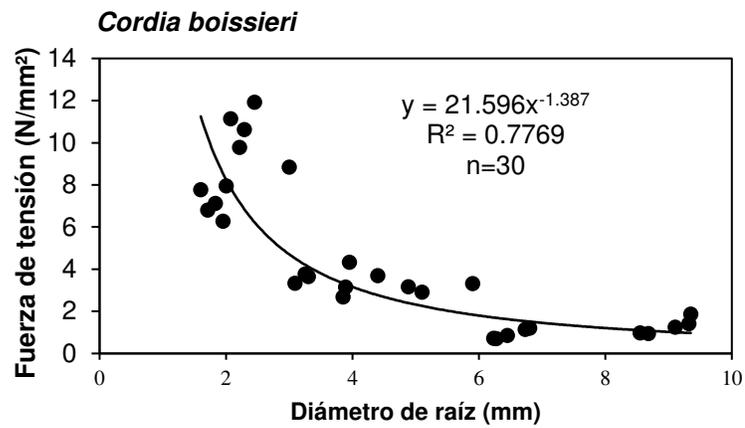
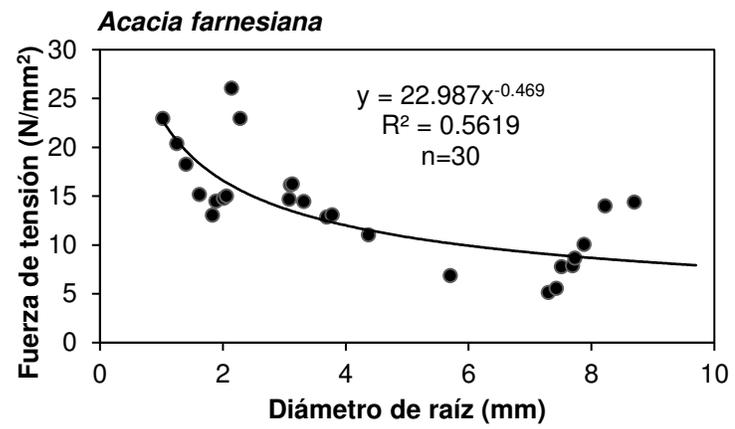


Figura 29 Relación entre el diámetro de raíz y fuerza de tensión para las especies estudiadas.

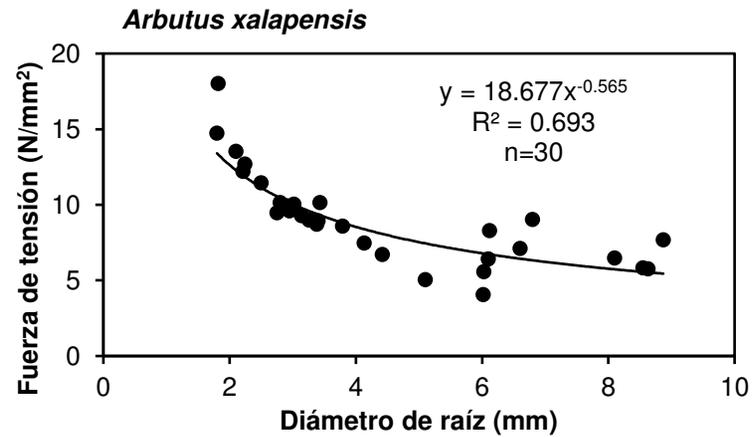
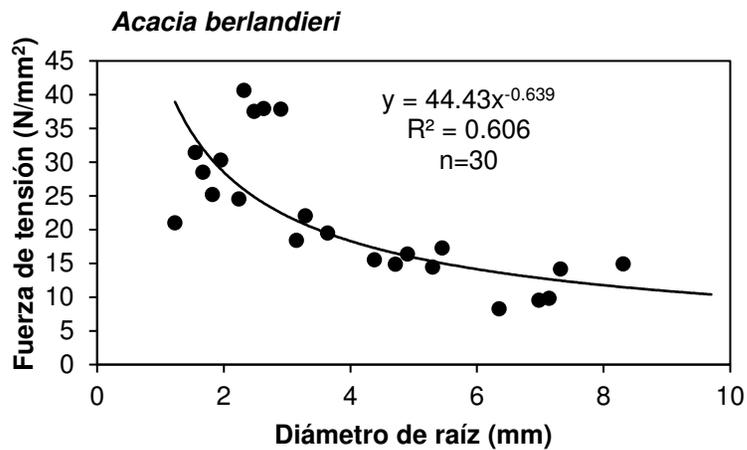
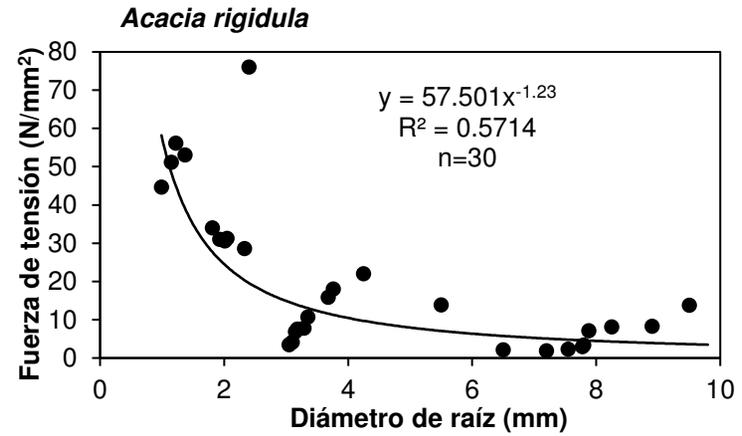
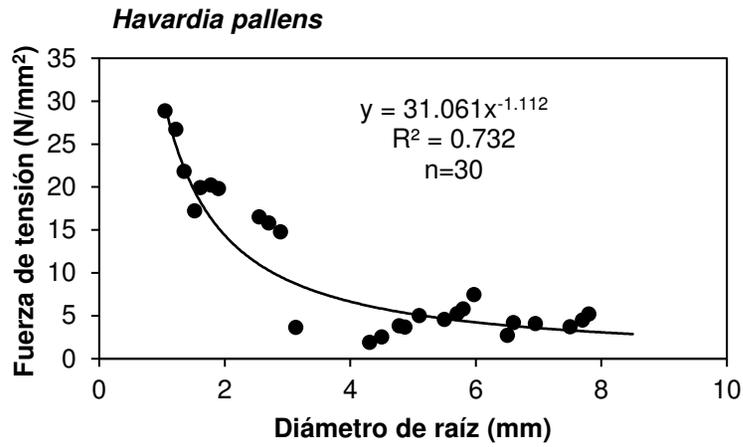


Figura 30 Relación entre el diámetro de raíz y fuerza de tensión para las especies estudiadas.

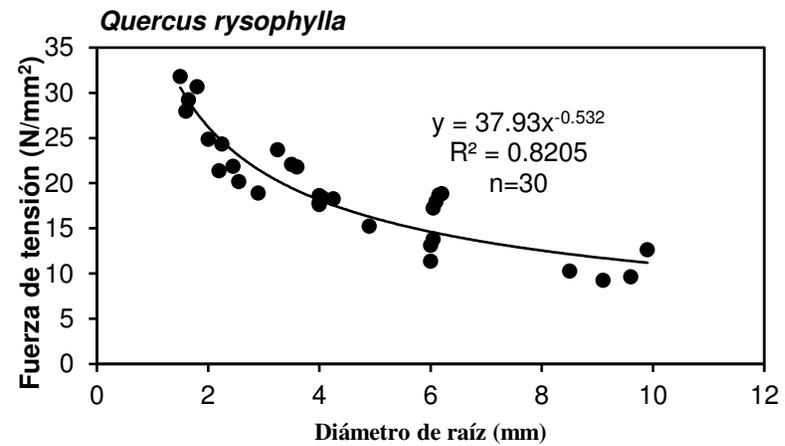
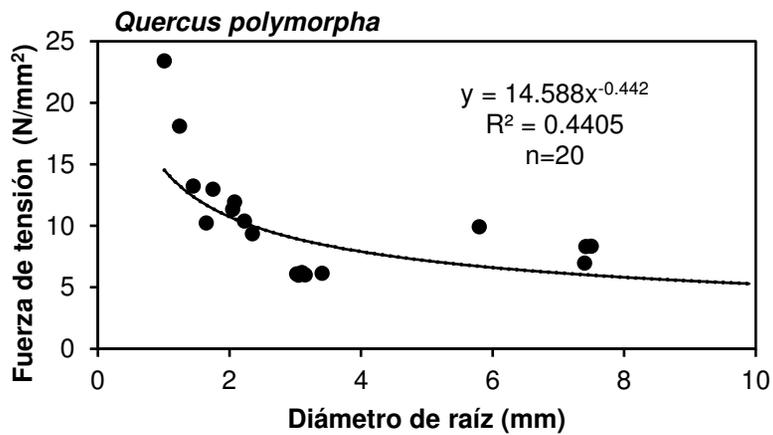
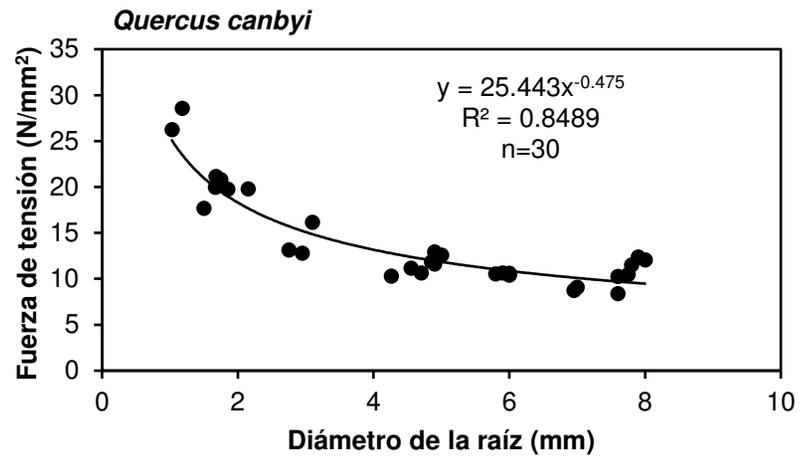
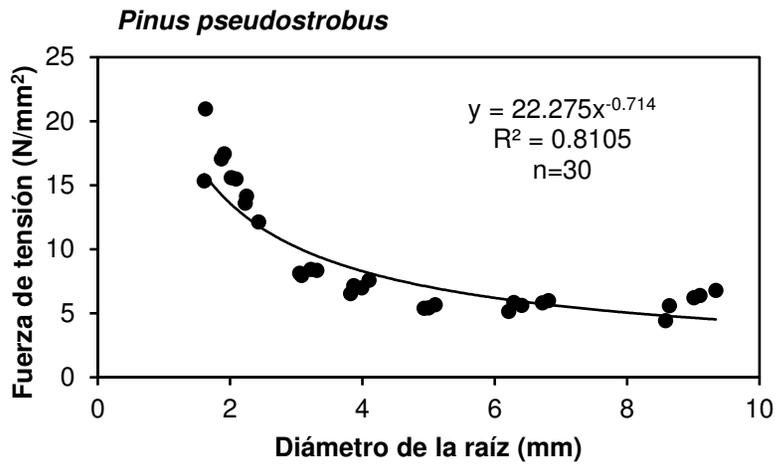


Figura 31 Relación entre el diámetro de raíz y fuerza de tensión para las especies estudiadas.

Los valores promedio de fuerza de tensión se muestran de manera ascendente: *A. berlandieri* > *A. rigídula* > *Q. rysophylla* > *Q. canbyi* > *A. farnesiana* > *Q. polymorpha* > *H. pallens* > *P. pseudostrobus* > *A. xalapensis* > *C. boissieri* (Figura 32).

La fuerza de tensión calculada para las raíces de las especies del Matorral Espinoso Tamaulipeco, fluctuó por categoría diamétrica en valores de 1.11 N mm⁻² en *C. boissieri* en diámetros de 6-10 mm (Categoría III) a 43.63 N mm⁻² en *A. rigídula* con diámetros de 0-3 mm (Categoría I).

Todas las especies estudiadas mostraron una tendencia negativa respecto a fuerza de tensión y diámetro que concuerda con varios estudios, Operstein y Frydman 2000; Norris 2005; Mattia et al. 2005; Bischetti et al. 2005; Tosi 2007. Donde muestran que la fuerza de tensión de la raíz (T_r) disminuye con el aumento del diámetro de raíz.

En general, la fuerza de tensión para las especies estudiadas se puede predecir bien por el diámetro de raíz, a excepción de *Q. polymorpha*. La ausencia de una relación alta (R^2) entre la resistencia a la tracción y el diámetro de raíz para *Q. polymorpha* no es de extrañar, dada la cantidad de factores que además del diámetro de raíz, están controlando la fuerza de tensión (T_s) tales como variaciones en la edad de la raíz (Genet et al. 2005), tasa de crecimiento, textura del suelo y estado de nutrientes, puede ser responsable de la variabilidad en la fuerza de tensión (Polen y Simon 2005).

Sin embargo, en el caso específico de *Q. polymorpha* el espesor de la corteza de raíz también puede explicar la pobre correlación entre la resistencia a la tracción y el diámetro de la raíz para la especie mencionada.

Karrenberg et al. (2003) afirman que el diámetro de la raíz por sí solo no es un indicador confiable para las especies que tienen corteza de raíz con

un espesor considerable. Los tejidos de la corteza de la raíz contribuirán en resistencia al aumentar la fricción entre la raíz y el suelo, pero son de menor importancia cuando las propiedades mecánicas del material de la raíz interior son mucho mejores que los de la corteza (Karrenberg et al. 2003).

Los resultados de ajuste bajo (R^2) mostrados en fuerza máxima de quiebre y fuerza de tensión (*A. farnesiana*, *A. berlandieri* y *Q. pollymorpha*) pueden compararse con resultados de ajuste bajo similares encontrados en estudios anteriores, y se sugirieron como: variaciones en la edad de la raíz (Genet et al. 2005), tasa de crecimiento, estado nutricional (Pollen y Simon 2005), clima y tiempo de muestreo (Operstein y Frydman 2000). El contenido de humedad de la raíz no es un factor influyente para T_s según los resultados presentados por Pollen (2007); Tosi (2007) y Sánchez Castillo et al., (2017).

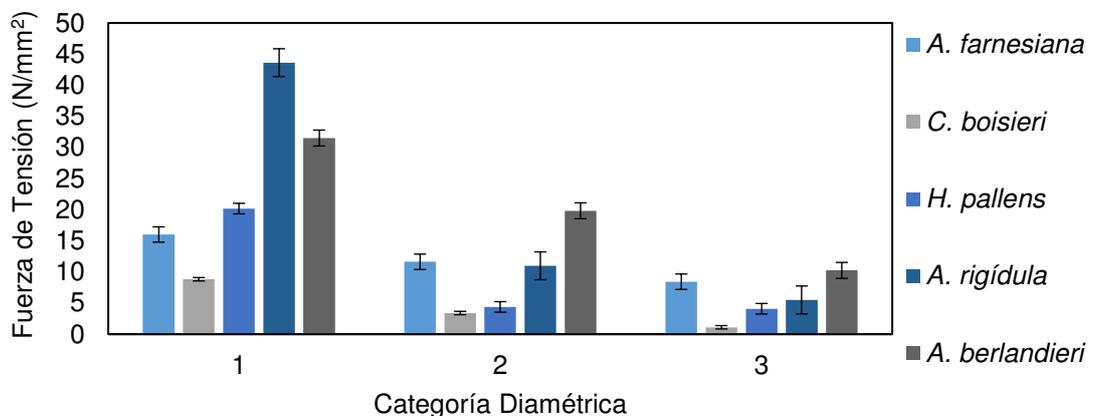


Figura 32. Valores de Fuerza de tensión (T_s) por categoría de diámetro para especies del MET.

La fuerza de tensión calculada para las raíces de las especies del Bosque de Pino-Encino, fluctuó en valores de 7.79 N mm^{-2} para *P. pseudostrobus* en diámetros de 6-10 mm (Categoría III) a 25.12 N mm^{-2} en la especie *Q. rysophylla* con diámetros de 0-3 mm (Categoría I). (Figura 33).

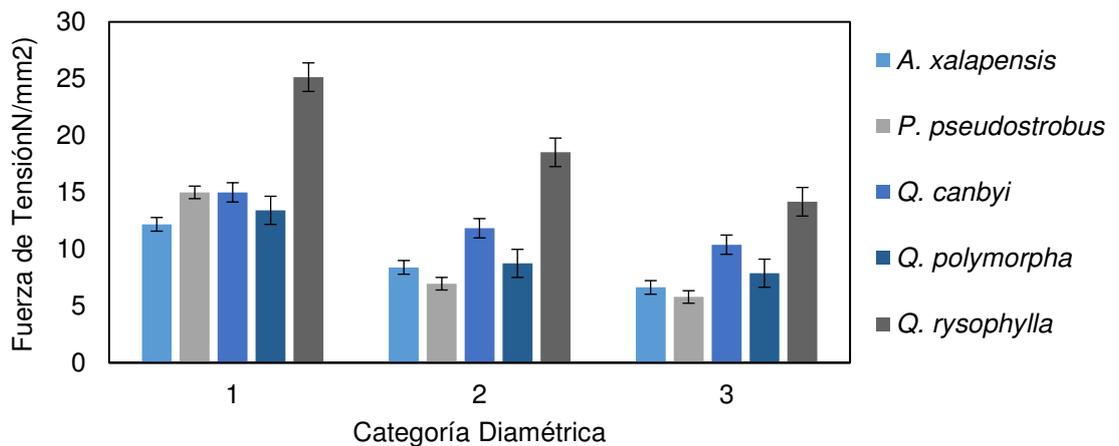


Figura 33 Valores de fuerza de Tensión por categoría de diámetro para especies del Bosque de Pino-Encino.

Aun así, de las 10 especies analizadas, la fuerza de tensión fluctuó en valores de 1.11 N mm⁻² en *C. boissieri* con diámetros de 6-10 mm (Categoría III) a 43.63 N mm⁻² *A. rígida* en diámetros de 0-3 mm (Categoría I) ambos valores de especies del MET (Figura 34).

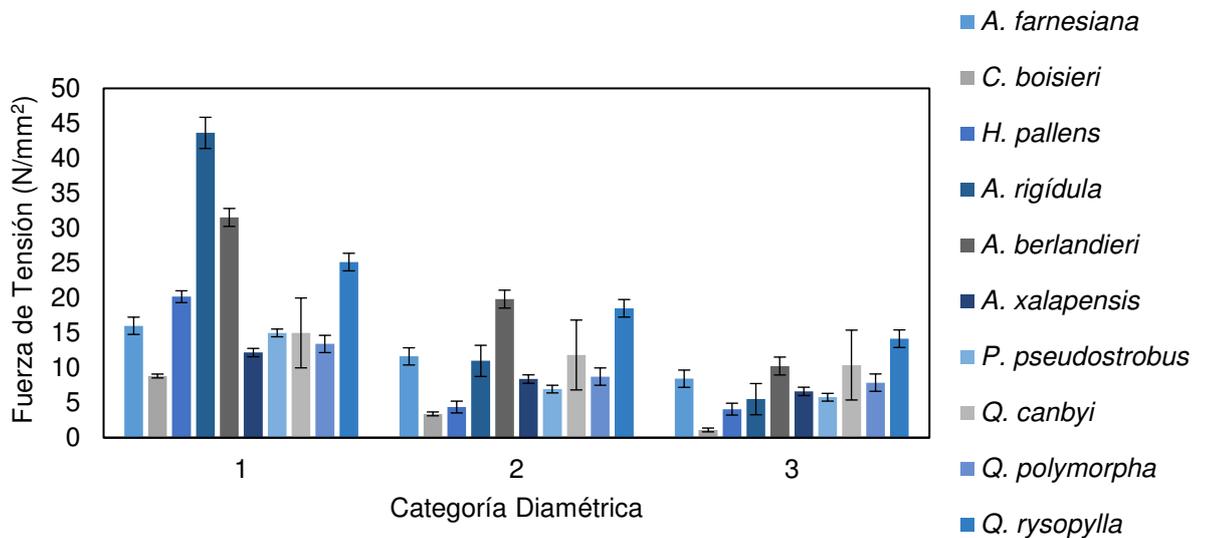


Figura 34 Valores de fuerza de tensión por categoría de diámetro para especies del MET y del Bosque de Pino- Encino.

La disminución en la fuerza de tensión de la raíz con el aumento diámetro de la raíz fue explicado por Genet et al. (2005), quienes afirman que se debe a diferencias en la estructura de la raíz. Estos autores atribuyen esta relación contenidos de celulosa altos en raíces finas. Ellos observaron que la fuerza de tensión aumentó con la disminución del diámetro de la

raíz y va aumentando según el contenido de celulosa para *Pinus pinaster* y *Castanea sativa*.

Mostrando las 10 especies analizadas de manera ascendente *C. boissieri*<*A. xalapensis*< *P.pseudostrobus*<*H.pallens*<*Q. polymorpha*<*A.farnesiana*<*Q. canbyi*<*Q. rysophylla*<*A.rigídula*<*A.berlandieri* (Tabla 8).

Tabla 8 Valores máximos, mínimos y media de fuerza de tensión (T_s) en las especies estudiadas para cada una de las categorías diamétricas.

Especie	T_s (N/mm^2)			
	CI	CII	CIII	Media
<i>A.farnesiana</i>	16.02	11.63	8.44	12.03
<i>C.boissieri</i>	8.83	3.4	1.11	4.45
<i>H. pallens</i>	20.18	4.39	4.09	9.50
<i>A. rigídula</i>	43.63	10.99	5.51	20.04
<i>A.berlandieri</i>	31.52	19.83	10.25	22.53
<i>A. xalapensis</i>	12.18	8.39	6.63	9.07
<i>P. pseudostrobus</i>	14.99	6.95	6.79	9.57
<i>Q. Canbyi</i>	14.99	11.83	10.39	12.40
<i>Q. polymorpha</i>	13.42	8.74	7.88	10.01
<i>Q. rysophylla</i>	25.13	18.52	14.17	19.27

La fuerza de quiebre fue mayor en todas las especies en los diámetros de 6-10 mm (categoría III). Al contrario de la fuerza de tensión, en la que se registraron los valores más altos en los diámetros de 0-3 mm (Categoría I).

Abdi y colaboradores (2010) mostraron también que la fuerza de tensión disminuye al aumentar el diámetro y que la relación entre estas dos variables sigue una función de potencia negativa. Los resultados obtenidos son consistentes con los hallazgos de muchos investigadores (Gray- Sotir 1996; Bischetti et al., 2005; Tosi 2007; Burylo et al, 2011; Ji et al., 2012). Esta relación a su vez está influenciada por la estación y factores abióticos como el estrés mecánico (Plomion et al., 2001)

Por otro lado, se señala que las raíces con diámetros mayores poseen aparte de menor fuerza de tensión, menor elasticidad. El orden de importancia de las especies estudiadas de acuerdo a sus propiedades mecánicas fue encontrado como: *Acacia berlandieri* > *Quercus rysophylla* > *Pinus pseudostrabus*.

Es sabido que los valores podrían verse influenciados por la combinación de diferencias específicas de especies, especímenes y condiciones del sitio. Estas influencias también se pueden observar en las relaciones de fuerza de tensión - diámetro, aunque muestran una tendencia, se puede observar una adaptación relativamente pobre de los modelos para *Q. polymorpha* y *A. rigidula*, esto se espera dado los numerosos factores diferentes al diámetro que controlan los T_s .

Las propiedades mecánicas se ven afectadas no solo por las especies y las diferencias de diámetro, sino que también pueden estar involucrados otros factores. Según informa Gray y Sotir (1996), los valores de fuerza de tensión de las especies de madera dura varían aproximadamente de 8 a 80 N mm⁻² con diámetros de 2 mm a 15 mm, las especies analizadas en este estudio variaron de 4.45 N mm⁻² a 22.12 N mm⁻² con diámetros de 0.99 mm a 9.91 mm.

Es importante distinguir entre la resistencia a la fuerza de tensión de un sistema de raíces propiamente dicho y la fuerza de tensión de un segmento de raíz. Las especies de árboles suelen desarrollar dos tipos de raíces: raíces largas y cortas, el tipo largo de raíces usualmente se convierte en parte del sistema de raíces para el anclaje y raíces cortas emergen como ramas laterales que no experimentan espesamiento secundario y son más finas comparadas con raíces largas (Hermann, 1977), debido a las limitaciones del diámetro de la máquina de ensayo, los segmentos de raíz ensayados pertenecen a la parte del sistema radicular a un metro del tronco, en un plano horizontal con diámetros

comprendidos entre 1 y 10 mm correspondientes a segmentos de raíces laterales.

En un sistema raíz idealizado, si se aplica la fuerza de tensión en la raíz de la base, la falla puede ocurrir en cualquier parte del primer segmento de la raíz, también por la distribución de la carga entre la rama lateral y el segundo segmento de la raíz primero en el lateral y luego en el segundo segmento de raíz, momento en el que falla el sistema radicular. Los valores de resistencia a la tracción presentados en este estudio dan una predicción razonable de las fuerzas necesarias en las primeras instancias de falla de raíz (Morgan y Rickson 1995; Wu y Watson 1998), lo que permite la comparación entre especies y cuantificación de uso potencial contra desastres relacionados con sedimentos.

CONCLUSIONES

Generalmente, durante un fallo de pendiente, las raíces pueden deslizarse, romperse o estirarse. El deslizamiento de las raíces está influenciado por características del suelo, pero cuando las raíces se rompen, este quiebre está influenciado por la fuerza de tensión la cual es el parámetro más importante a considerar. Por esta razón la fuerza de tensión es la propiedad mecánica que pudiera usarse para elegir las mejores especies en cualquier ecosistema para prevenir los desastres relacionados con los sedimentos. Los valores mayores de las medias de fuerza de tensión de las especies del Matorral Espinoso Tamaulipeco son *A. berlandieri* (22.12 N/mm²) y *A. rigidula* (20.54 N/mm²). La especie con mayor fuerza de tensión en el Bosque de Pino-Encino es *Q. rysophylla* (19.27 N/mm²) seguido de *Q. Canbyi* (13.07 N/mm²). La especie con mejor fuerza de tensión de los dos ecosistemas es *A. berlandieri* en la Categoría diamétrica I.

Se mostraron las propiedades mecánicas de los sistemas radiculares (fuerza máxima de quiebre y fuerza de tensión) de las especies nativas analizadas, en diferentes categorías diamétricas, para su aplicación en las prácticas de bioingeniería del suelo, sin embargo, se deben realizar análisis adicionales de las características morfológicas del sistema radicular como profundidad, volumen y distribución del sistema radicular.

Los resultados de este estudio siguen la contribución de datos de las propiedades mecánicas de las especies nativas de Sierra Madre Oriental para poder usarse en la aplicación de prácticas de bioingeniería de suelos o en laderas urbanas propensas a desastres. El conocimiento de una gama de resistencias de tensión en la raíz proporciona información importante que es a menudo requerida en el análisis de evaluación de la raíz-suelo, y puede ser útil en la selección de especies de plantas para control de la erosión.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abernethy, B., Rutherford, I.D. 2001: The distribution and strength of riparian tree roots in relation to riverbank reinforcement. *Hydrological Processes* 15: 63–79.
- Alcántara, I. (2001): Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. *Geomorphology*, No. 47, pp, 107-124.
- Barker, D.H.; Watson, A.J.; Sombatpanit, S.; Northcutt, B.; Maglinao, A.R.(Ed.) 2004: *Ground and Water Bioengineering for Erosion Control and Slope Stabilization*. Sciences Publishers Inc., USA. 419 p.
- Böhm, W. 1979: *Methods of studying root systems*. Ecological Studies No. 33. Springer-Verlag, Berlin.
- Cammeraat, E., Van Beek, R. & Kooijman, A. 2005. Vegetation succession and its consequences for slope stability in SE Spain. *Plant and Soil* 278: 135-147.
- Chivitá C.I., (2008): Estimación de la susceptibilidad ante deslizamientos: aplicación de conjuntos difusos y las teorías de la posibilidad y de la evidencia, en *Ingeniería e Investigación*, abril, Vol. 28, No. 1, pp. 26-40.
- Collison. A.J.C., Anderson, G. & Lloyd, D.M. 1995. Impact of vegetation on slope stability in a humid tropical environment: a modelling approach. *Proceedings of the Institute of Civil Engineers: Water and Maritime Engineering* 112: 168-175.
- De Baets, S., Poesen, J., Reubens, B., Wemans, K., Baerdemaeker, J.D. y Muys, B. 2008. Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength. *Plant and Soil* 305: 207-226.
- Eason, G.; Yarbrough, L.D. 2002: The effects of riparian vegetation on bank stability. *Environmental & Engineering Geoscience* 8(4): 63–79.
- Ekanayake, J.C.; Phillips, C.J. 1999: A method for stability analysis of vegetated hillslopes. *Canadian Geotechnical Journal* 36: 1172–1184.
- Ekanayake, J.C.; Phillips, C.J.; Marden, M. 2004: A comparison of methods for stability analysis of vegetated slopes. Pp. 171–181
- Northcutt, B.; Maglinao, A.R. (Ed.) *Ground and Water Bioengineering for Erosion Control and Slope Stabilization*. Sciences Publishers Inc., USA.
- González de Vallejo y Ferrer, (2004) *Ingeniería Geológica*, Pearson Education, S.A., Ribeira del Loira, 28, Madrid, 365-378Pp
- Gray, D.H.; Leiser, A.T. 1982: *Biotechnical Slope Protection and Erosion Control*. Van Nostrand Reinhold, New York. 271 p.

- Gray, D.H.; Sotir, R.B. 1996: Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization: a Practical Guide for Erosion Control. Wiley, New York. 378 p.
- IPCC (2007): "Cambio climático 2007", Informe de síntesis. En Intergovernmental Panel on Climate Change. Ginebra.
- Marmolejo, J. 2000. Diversidad fúngica en dos ecosistemas forestales del estado de Nuevo León, México. Reporte Científico No. 36. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Forestales. 43 Pp.
- Mateos, R.M, Azañón, J.M., Morales, R., López-Chicano, J.M., 2007: Regional prediction of landslides in the Tramuntana Range (Majorca) using probability analysis of intense rainfall. Zeitschrift für Geomorphology, N° 51, 3. 287-306.
- Méndez G. J., Návar J., González O. V, (2008): Análisis de tendencias de precipitación (1920-2004) en México, en Investigaciones Geográficas, No. 65, pp. 38 -55.
- Sánchez C. L. 2015. An inetgrated study of sediment related disaster prevent and erosion control for urbanized forest slopes in Nuevo León, México, 1-7, 36-39.
- Scheidegger, A. (1994). "Hazards: singularities in geomorphic systems". Geomorphology, No. 10, pp 19–25.
- Stokes, A., Ball, J., Fitter, A.H., Brain, P. y Coutts, M.P. 1996. An experimental investigation of the resistance of model root systems to uprooting. Annals of Botany 78: 415-421.
- Synnott, T., y Marroquín, J. 1987. Ecología del terreno de Santa Rosa, Iturbide, Nuevo León. Con una lista anotada de los árboles y arbustos. Reporte Científico No. 6. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León. 36 Pp.
- Van Beek, L.P.H., Wint, J., Cammeraat, L.H. y Edwards. J.P. 2005. Observation and simulation of root reinforcement on abandoned Mediterranean slopes. Plant and Soil 278: 55-74
- Watson, A.J.; O'loughlin, C.L. 1985: Morphology, strength, and biomass of manuka roots and their influence on slope stability. New Zealand Journal of Forestry Science 15: 337–348.
- Watson, A.J.; Marden, M.; Rowan, D. 1995: Tree species performance and slope stability.
- Watson, A.J.; Phillips, C.J.; Marden, M. 1999: Root strength, growth and rates of decay: root reinforcement changes of two tree species and their contribution to slope stability. Plant and Soil 217: 39–47.

Wu, T.H. 1976: Investigation of landslides on Prince of Wales Island. Civil Engineering Department, Ohio State University, Geotechnical Engineering Report 5. 94 p.

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.

Wynn, T.M.; Mostaghimi, S.; Burger, J.A.; Harpold, A.A.; Henderson, M.B.; Henry, L. 2004: Ecosystem restoration: variation in root density along stream banks. Journal of Environmental Quality 33: 2030–2039.