

COMPOSICIÓN QUÍMICA Y MORFOLOGÍA DE RAÍCES DE CINCO ESPECIES ARBUSTIVAS NATIVAS Y SU INFLUENCIA EN LA FIJACIÓN DEL SUELO

CHEMICAL COMPOSITION AND ROOT MORPHOLOGY OF FIVE NATIVE SHRUB SPECIES AND THEIR INFLUENCE ON SOIL FIXATION

BRENDA FERNÁNDEZ-VILLARREAL, REBECA ZAVALA-GONZÁLEZ, ISRAEL CANTÚ-SILVA*, HUMBERTO GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales, Linares, México.

*Autor de correspondencia: icantu59@gmail.com

Resumen

Antecedentes: El uso de vegetación es una práctica recurrente para la fijación de suelo y dependerá de las características del sistema radical.

Preguntas e hipótesis: La composición química de las raíces es diferente entre especies e influenciada por su diámetro. La clasificación morfológica es diferente entre las especies.

Especies estudiadas: *Broussonetia papyrifera*, *Caesalpinia mexicana*, *Dalea hospes*, *Decatropis bicolor* y *Zanthoxylum fagara*.

Área de estudio y fechas: Matorral Submontano, Parque Ecológico Chipinque, San Pedro Garza García, Nuevo León. Junio a noviembre 2019.

Métodos: Se clasificaron raíces por especie en tres categorías diamétricas (I, 0.1-2.9 mm; II, 3-5.9 mm; III, 6-9.9 mm). Previo a los análisis químicos se retiró la corteza de las raíces. La composición química se determinó por fraccionamiento secuencial de la pared celular. La morfología radical se clasificó por comparación con metodologías establecidas.

Resultados: Se encontró una relación decreciente en el contenido de hemicelulosa y celulosa con el aumento del diámetro de raíz, en todas las especies fueron mayores en la categoría diamétrica I. Los mayores contenidos de lignina se encontraron en la categoría III (6-9.9 mm). El orden de importancia considerando el contenido de celulosa para protección de laderas fue: *Dalea hospes* > *Broussonetia papyrifera* > *Caesalpinia mexicana* > *Decatropis bicolor* > *Zanthoxylum fagara*.

Conclusiones: Con base en la composición química de las raíces y la morfología radical, se propone un método de revegetación para la fijación del suelo, *Dalea hospes* y *Decatropis bicolor* en la cima de la ladera, *Zanthoxylum fagara* y *Caesalpinia mexicana* en la parte media y *Broussonetia papyrifera* al pie de la ladera.

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

Abstract

Background: The use of vegetation is a recurrent practice for fixing soil and will depend on the characteristics of root and the root system.

Question and hypothesis: Root chemical composition is different among species, and it is influenced by root diameter. Morphological classification is different among species.

Studied Species: *Broussonetia papyrifera*, *Decatropis bicolor*, *Dalea hospes*, *Caesalpinia mexicana* and *Zanthoxylum fagara*.

Study area and dates: Submontane scrub Chipinque Ecological Park, San Pedro Garza García, Nuevo Leon. June to November 2019.

Methods: Roots by species were classified into three diameter categories (I 0.1-2.9 mm; II 3-5.9 mm; III 6-9.9 mm). Prior to chemical analysis, the bark was removed from the roots. The chemical composition was determined by sequential fractionation of the cell wall. Root morphology was classified by comparison with established methodologies.

Results: A decreasing relationship was found in the hemicellulose and cellulose content with the increase in the root diameter, in all the species they were higher in the diametric categories I (0.1-2.9 mm). The highest lignin contents were found in category III (6-9.9 mm). The order of importance in terms of cellulose content for soil protection was: *Dalea hospes* > *Broussonetia papyrifera* > *Caesalpinia mexicana* > *Decatropis bicolor* > *Zanthoxylum fagara*.

Conclusions: Based on root chemical composition and root system morphology, a revegetation method is proposed for soil fixation, *Dalea hospes* and *Decatropis bicolor* at the top of the slope, *Zanthoxylum fagara* and *Caesalpinia mexicana* in the middle and *Broussonetia papyrifera* at the foot of hillside.

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

En una era definida por las variaciones del cambio climático, cada vez son más frecuentes los desastres naturales. Por este motivo, las investigaciones y estrategias efectivas y económicas que mitiguen el riesgo de los movimientos en masa son necesarias. En este sentido, el uso de la vegetación se ha encontrado como una solución prometedora en atención a la reducción de riesgos relacionados con los deslizamientos de tierra en laderas (Danjon *et al.* 2008). No obstante, aunque es cierto que la condición climática exacerba estos eventos, Chapa-Guerrero *et al.* (2016) mencionan que tales efectos se agravan especialmente en áreas con planeaciones urbanas y construcciones sobre taludes escarpados.

El área metropolitana de Monterrey en el noreste de México ha presentado una expansión urbana y demográfica considerable y actualmente se sigue incrementando el desarrollo de nuevos sectores residenciales sobre las laderas de la Sierra Madre Oriental. Este crecimiento incluye la construcción de avenidas sinuosas con altitudes que van de los 550 a 1,350 m snm, presentando una alta vulnerabilidad ante la ocurrencia de desastres naturales y movimientos en masa de laderas (Chapa-Guerrero *et al.* 2016). La condición climática extremosa agrava esta fragilidad ante desastres. Durante la temporada de lluvias en la región, prevalecen los calores intensos, lo que disminuye la cubierta vegetal del suelo. Con la llegada de la temporada de precipitaciones, se genera un desgaste mecánico y estructural en el suelo causado por la acción de la lluvia al contacto con superficies desprotegidas. Por otro lado, el aumento del nivel freático y saturación de suelo conlleva a la inestabilidad de taludes y pérdida de suelo debido al transporte y deposición de sedimentos (Alvarado *et al.* 2014).

El uso de vegetación aplicado en técnicas de bioingeniería se ha convertido en una práctica recurrente para la fijación de suelo en pendientes inestables (Genet *et al.* 2006). El grado de fijación en el suelo dependerá en gran medida de las propiedades de ingeniería de las plantas, estas propiedades son funciones combinadas de las características mecánicas, anatómicas y morfológicas del sistema radical como longitud, fuerza de tensión, composición química, diámetro, orientación, entre otras (Saifuddin *et al.* 2015).

Los componentes químicos son los encargados de regular la resistencia al quiebre de una raíz ante un fallo. Genet *et al.* (2010) atribuyen a la celulosa las variaciones en la fuerza de tensión en las raíces. Un alto contenido de celulosa en la raíz permitirá a la planta mantenerse adherida al suelo y evitar deslizamientos (Saifuddin *et al.* 2015). La biomasa de las raíces de las plantas consiste principalmente en compuestos celulósicos (holocelulosa y α -celulosa), lignina y extractos. La lignina también puede afectar las propiedades de resistencia de las raíces, principalmente cuando los contenidos de humedad son altos (Genet *et al.* 2005). La lignina junto con la celulosa constituye los principales polímeros naturales responsables de dar rigidez a la planta (Valenciaga & Chongo, 2004).

A través de la comprensión de estos procesos se pueden implementar soluciones oportunas para la restauración ecológica y prácticas de protección de suelo. El sistema radical de las plantas influye en el éxito de la fijación de suelo en laderas y por tanto se convierten en una alternativa ecológica en soluciones de ingeniería civil cuando se trata de deslizamientos de tierra y erosión (Stokes *et al.* 2014). Por esta razón el estudio de cómo las características mecánicas, químicas y morfológicas de las especies vegetales influyen en la fijación del suelo es de suma importancia.

El objetivo del presente estudio fue determinar la composición química y caracterización morfológica de raíces de cinco especies nativas que crecen en áreas de ladera en la Sierra Madre Oriental en el noreste de México y su relación con la fijación del suelo. Como hipótesis se planteó que la composición química de las raíces es diferente entre especies y está influenciada por su diámetro, así como las características morfológicas de las raíces también difieren entre las especies.

Materiales y métodos

Área de estudio. El área de estudio se encuentra colindante al Parque Ecológico Chipinque, el cual forma parte del Área Natural Protegida Parque Nacional Cumbres de Monterrey (25° 33' y 25° 35' N, 100° 18' y 100° 24' O), ubicado en el municipio de San Pedro Garza García, al noreste de México. Presenta altitudes que varía de los 750 a 3,000 m snm aproximadamente (Alanís-Rodríguez *et al.* 2010). De acuerdo con García (2004), el tipo de clima es semiseco semicálido, con marcadas lluvias en verano (BS1hw), con una temperatura media anual de 21.3 °C, y precipitación

nes anuales que varían entre 300 y 500 mm. Los tipos de suelo predominantes en el área de estudio corresponden a litosoles y regosoles calcáricos, rendzinas, luvisoles y xerosoles, con clases texturales medias (García-Bastida 2013).

Selección de especies. Se colectaron muestras de raíz de cinco especies [*Broussonetia papyrifera* (L.) Vent., árbol de hasta 15 m (Flora of North America 1993), *Caesalpinia mexicana* A. Gray., arbusto o árbol de 1.5-6 m (Alanís *et al.* 1995), *Dalea hospes* (Rose) Bullok., arbusto de 1-2 m de altura (Estrada-Castillón 1998), *Decatropis bicolor* (Zucc.) Radlk., arbusto o árbol de 2-7 m de altura (Alanís *et al.* 1995) y *Zanthoxylum fagara* (L.) Sarg. arbusto o árbol de hasta 10 m de altura (Alanís *et al.* 1995)], nativas de la Sierra Madre Oriental, propias del matorral submontano. Se colectaron las especies en función de su distribución y abundancia en el sitio y con presencia en áreas con pendiente (Sánchez-Castillo *et al.* 2017, Zavala-González *et al.* 2019). Se consideraron tres clases diamétricas para clasificar las raíces, con rangos de 0.10-10 mm, categorizándose como diámetro grande, medio y chico (Zavala-González *et al.* 2019). Además, se tomó en cuenta la arquitectura del sistema radical para la caracterización morfológica siguiendo la clasificación de Styczen & Morgan (1994), los contenidos de humedad en la raíz y la altitud del sitio donde se distribuyen las especies estudiadas.

Método de muestreo del sistema radical. Se seleccionó al azar un individuo representativo de cada especie investigada y el sistema radical se extrajo cuidadosamente de forma manual mediante una pala, considerándose una exposición óptima y accesible en la pendiente (Zavala-González *et al.* 2019). Una vez retirado el sistema radical, se colocaron en bolsas separadas con su etiquetado correspondiente y se almacenaron temporalmente en una hielera para conservar el contenido de humedad. Posteriormente las muestras fueron trasladadas al Laboratorio de Química de la Facultad de Ciencias Forestales de la UANL para su análisis.

Preparación de muestras para caracterización morfológica radical. Para determinar el tipo de morfología cada una de las especies fue caracterizada a partir de fotos y mediciones en el sistema radical extraído. Se consideró visualmente el ángulo de orientación y con ayuda de una cinta métrica se midió la longitud de la raíz. Posterior a ello la densidad del sistema radical se estimó a partir de un conteo visual.

Preparación de las muestras individuales de raíz para su análisis químico. En el laboratorio se descartaron las raíces dañadas (Sánchez-Castillo *et al.* 2017). Posteriormente, se tomó el sistema radical completo de cada una de las especies y con ayuda del aparato calibrador vernier digital (MITUTOYO) se procedió a separar las raíces respecto a diámetros pequeños, medianos y grandes (Figura 1). Las muestras obtenidas 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 la determinación de contenidos químicos (% de celulosa, % de lignina y % de hemicelulosa) se utilizó el método desarrollado por Van Soest *et al.* (1991), el cual permite fraccionar secuencialmente las proporciones correspondientes a la fracción de la pared celular compuesta por celulosa y lignina y refleja la cantidad de hemicelulosa.



Figura 1. A) Sistema radical de individuos de *Caesalpinia mexicana*; B) Secciones del sistema radical de *Broussonetia papyrifera*; C) Sistema radical de *Broussonetia papyrifera*.

lulosas presentes en la pared celular (Segura *et al.* 2007). Tomando en cuenta el método utilizada por Genet *et al.* (2010), la corteza fue retirada de las muestras de raíz con ayuda de un bisturí (Categorías II y III). Para la categoría diamétrica I se utilizó un bisturí y una lupa para una mejor visión. Cada muestra se molió utilizando el molino modelo 4 # 3375-E45 Thomas Scientific n/s 101327 (Figura 2). Para facilitar el trabajo de molido, las raíces se sometieron a una temperatura de 60 °C en la estufa (Felisa®, Model FE-292AD, México) durante 24 h, ya que a esta temperatura no se alteran las propiedades químicas de la raíz. Se vertió 0.5 g de cada muestra en una bolsa de filtro de fibra (porosidad de 25 mm) y cada bolsa se marcó cuidadosamente con su número de identificación (Genet *et al.* 2005).



Figura 2. Proceso de método químico en el laboratorio.

Análisis químicos. Determinación de lignina.- Se preparó una solución de ácido sulfúrico al 72 % (v/v). Se colocaron las muestras en un litro de solución, agitándose cada 30 min durante 3.5 h. Finalizado este proceso, se realizaron de 3 a 5 lavados con agua destilada a 90 °C hasta que las muestras quedaran libres de ácido. Para conocer el pH de las muestras después de cada lavado se utilizaron tiras de prueba indicadoras de pH (tira de papel Universal Indicator Paper, Ph1-14). Posteriormente, se introdujeron en acetona pura (≥ 99.5 %, v/v) por 5 min, para después introducir a la estufa (Felisa®, Model FE-292AD, México), a 105 °C por 2 h y se registró el peso.

Determinación de celulosa.- El porcentaje de celulosa se calculó sobre una base de materia seca (%) y la diferencia relativa entre el peso inicial y final de cada muestra.

Determinación de hemicelulosa.- El procedimiento de cálculo de hemicelulosa se realizó determinando previamente el porcentaje de fibra detergente neutra (FDN) y fibra detergente ácida (FDA) y por diferencia de estos componentes se obtuvo el porcentaje de hemicelulosa:

$$\% \text{ Hemicelulosa} = \% \text{ FDN} - \% \text{ FDA}$$

Contenido de humedad.- De acuerdo a Faisal (2010), el contenido de humedad se calculó de la siguiente manera:

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

Análisis estadísticos. Con el fin de probar los supuestos de normalidad y homocedasticidad de varianzas (Prueba de Levene), las variables lignina, celulosa y hemicelulosa fueron sometidas a pruebas de normalidad de Kolmogorov-Smirnov, cumpliendo con los supuestos únicamente la variable celulosa (transformación mínimos cuadrados). El análisis de varianza de dos vías se empleó para evaluar diferencias en el contenido de celulosa entre las especies (Factor A), diámetros (Factor B) e interacción especie \times diámetro (AB). Se realizó la prueba de Tukey para la comparación de medias de contenido de celulosa para especies y diámetros. Dado que el resto de las variables no cumplieron los supuestos de normalidad, estas se analizaron mediante la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para la comparación de especies y diámetros para las diferentes variables. Se realizaron modelos de regresión (logarítmica, exponencial y polinómica) para determinar la relación de las variables con el diámetro de las raíces para cada una

de las especies. También, se efectuó una correlación de Spearman para conocer la relación entre las variables. Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el programa estadístico para ciencias sociales (IBM SPSS Statistics) versión estándar 22.0 para Windows.

Resultados

Composición química. Un total de 75 bolsas con muestra de raíz molida fueron analizadas: 15 para *Decatropis bicolor*, 15 para *Zanthoxylum fagara*, 15 para *Caesalpinia mexicana*, 15 para *Broussonetia papyrifera* y 15 para *Dalea hospes*. De acuerdo con los resultados obtenidos del análisis de varianza, se detectaron diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$) en la variable contenido de celulosa entre las especies, diámetros y para la interacción especie \times diámetro (Tabla 1).

Tabla 1. 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 \times diámetro (AB). El valor del R^2 ajustado del modelo es: 0.864.

Fuente variación	g.l.	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 \times B)	8	431.85	53.98	4.25	<.001**
Error	60	761.16	12.68		
Total	74				

**Diferencia altamente significativa ($P \leq 0.01$)

Los valores medios de contenido de celulosa para las especies estudiadas variaron de 28.16 % en *Caesalpinia mexicana* a 40.70 % en la especie *Dalea hospes* (Figura 3). La prueba de Tukey ($P = 0.05$) mostró que los contenidos medios de celulosa en *Decatropis bicolor* y *Zanthoxylum fagara* son iguales formando un mismo grupo y son

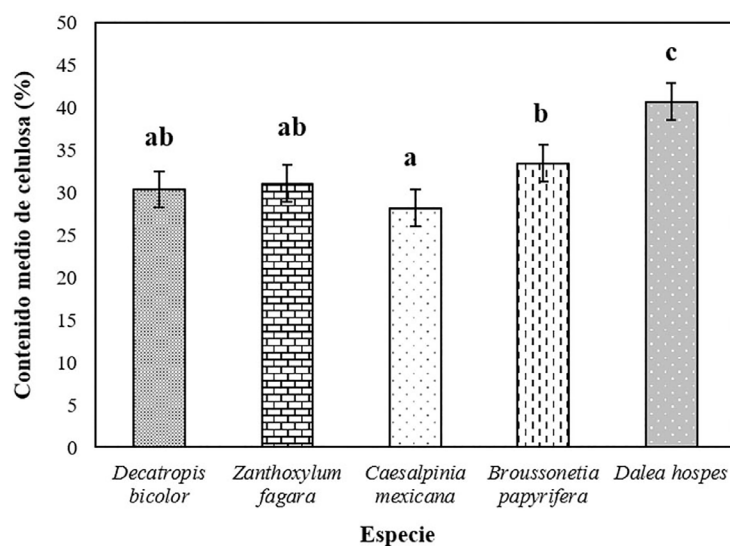


Figura 3. Valores medios del contenido de celulosa en cinco especies nativas. Medias con letras diferentes indican diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey ($P = 0.05$). Las barras de error indican la desviación estándar ($n = 25$).

estadísticamente iguales a *Caesalpinia mexicana* y *Broussonetia papyrifera*. *Dalea hospes* es superior y estadísticamente diferente al resto de las especies investigadas.

Los valores medios de contenido de celulosa para las diferentes categorías diamétricas fueron de 23.97 % para la categoría III (6.1 a 9.9 mm), 31.78 % para la categoría II (2.9 a 6.0 mm) y 42.46 % para categoría I (0.1 a 2.9 mm). La categoría I mostró los valores más altos de contenido de celulosa. La prueba de Tukey ($P = 0.05$) mostró que las categorías diamétricas I, II y III son estadísticamente diferentes entre sí (Figura 4).

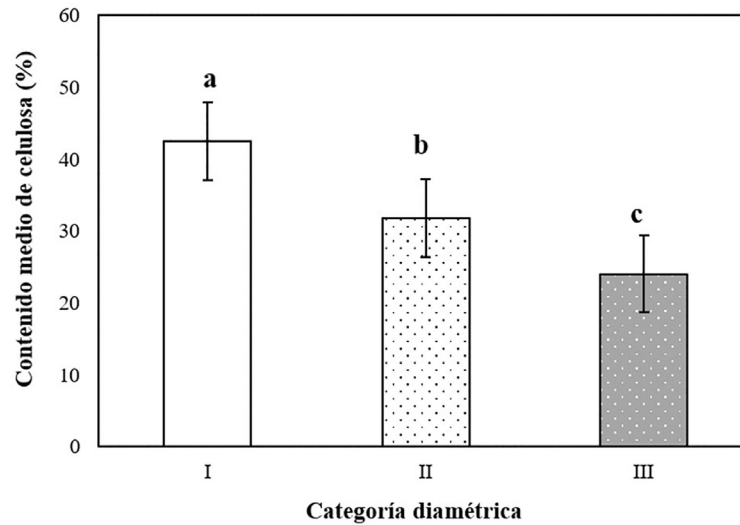


Figura 4. Valores medios del contenido de celulosa para tres categorías diamétricas, categoría III (6.1 a 9.9 mm) categoría II (2.9 a 6.0 mm) y categoría I (0.1 a 2.9 mm). Medias con letras diferentes indican diferencias estadísticas (Tukey $P = 0.05$). Las barras de error indican la desviación estándar ($n = 25$).

De acuerdo a los resultados obtenidos mediante la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, el contenido de hemicelulosa presentó diferencias altamente significativas entre las especies, mientras que el contenido de lignina no presentó diferencias. Para el diámetro de raíz, se detectaron diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$) para el contenido de lignina y hemicelulosa, (Tabla 2) y los valores de lignina aumentaron conforme aumento el diámetro. *Modelos de regresión para lignina, hemicelulosa y celulosa.* Se observó una relación creciente en los contenidos de lignina respecto al diámetro de la raíz. Esta tendencia se mantuvo presente para todas las especies; a mayor diámetro mayor contenido de lignina. *Decatropis bicolor* mostró los valores más altos del contenido de lignina

Tabla 2. Prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias en los contenidos de lignina y hemicelulosa entre especies y diámetros de la raíz.

Fuente de variación	Estadístico	Lignina	Hemicelulosa
Especies	χ^2	9.072	14.585
	gl	4	4
	Sig. Asintótica (valor P)	0.059 ^{NS}	0.006 ^{**}
Diámetro	χ^2	53.137	52.107
	Gl	2	2
	Sig. Asintótica (valor P)	<0.001 ^{**}	<0.001 ^{**}

*($P \leq 0.05$) diferencias significativas; **($P \leq 0.01$) diferencias altamente significativas. ^{NS}($P > 0.05$) diferencias no significativas.

(27.73 %) dentro de la categoría diamétrica III (diámetros de 6.1 a 9.9 mm). Los contenidos más bajos de lignina se encontraron dentro de la categoría diamétrica I (0.1 a 2.9 mm). La regresión simple de *Decatropis bicolor* se ajustó a un modelo exponencial ($R^2 = 0.943$), *Zanthoxylum fagara* se ajustó a un modelo logarítmico ($R^2 = 0.846$). *Caesalpinia mexicana* presentó un ajuste polinómico ($R^2 = 0.877$), *Broussonetia papyrifera* con ajuste polinómico ($R^2 = 0.952$) y *Dalea hospes* con ajuste exponencial ($R^2 = 0.894$), el diámetro explica el contenido de lignina a partir de los coeficientes de determinación (Figura 5).

Por otro lado, se observó una relación negativa entre los contenidos de hemicelulosa respecto al diámetro de raíces. *Caesalpinia mexicana* mostró los contenidos más altos con 59.65 % dentro de la categoría dimétrica I (0.1 a 2.9 mm). La regresión de *Decatropis bicolor* se ajustó logarítmicamente ($R^2 = 0.985$), *Zanthoxylum fagara* mostró un ajuste exponencial ($R^2 = 0.892$), *Caesalpinia mexicana* se ajustó polinómicamente ($R^2 = 0.719$), *Broussonetia papyrifera* se ajustó polinómicamente ($R^2 = 0.906$) y *Dalea hospes* mostró un ajuste exponencial ($R^2 = 0.904$). A partir de los coeficientes de determinación, se interpreta como el diámetro explica en una gran proporción el contenido de hemicelulosa (Figura 6).

Para todas las especies, los contenidos de celulosa se presentaron en mayores proporciones en las categorías diamétricas I (0.1 a 2.9 mm) y II (2.9 a 6.0 mm). Las ecuaciones de regresión para las especies *Decatropis bicolor* y *Zanthoxylum fagara* se ajustaron polinómicamente con coeficientes de determinación de $R^2 = 0.962$ y $R^2 = 0.934$, respectivamente. La especie *Caesalpinia mexicana* mostró un ajuste exponencial y un valor $R^2 = 0.736$ y las especies *Broussonetia papyrifera* y *Dalea hospes* se ajustaron logarítmicamente con $R^2 = 0.925$ y $R^2 = 0.954$, respectivamente (Figura 7). En todas las especies, a excepción de *Caesalpinia mexicana*, el diámetro explicó en más de un 90 % el contenido de celulosa.

Contenido de humedad en las raíces. Considerando los contenidos de humedad en la raíz para todas las especies, los porcentajes de los contenidos de humedad aumentaron en la categoría diamétrica III (6.1 a 9.9 mm). *Decatropis bicolor* mostró los valores más bajos de humedad, mientras que *Caesalpinia mexicana* presentó los valores más altos. Los porcentajes medios para cada clase diamétrica por especie fueron: *Decatropis bicolor*: I (5.48), II (6.61), III (6.82). *Zanthoxylum fagara*: I (6.71), II (6.80), III (12.13). *Caesalpinia mexicana*: I (6.25), II (7.52), III (14.66). *Broussonetia papyrifera*: I (7.38), II (7.93), III (8.50). *Dalea hospes*: I (5.91), II (5.90), III (7.37) (Figura 8).

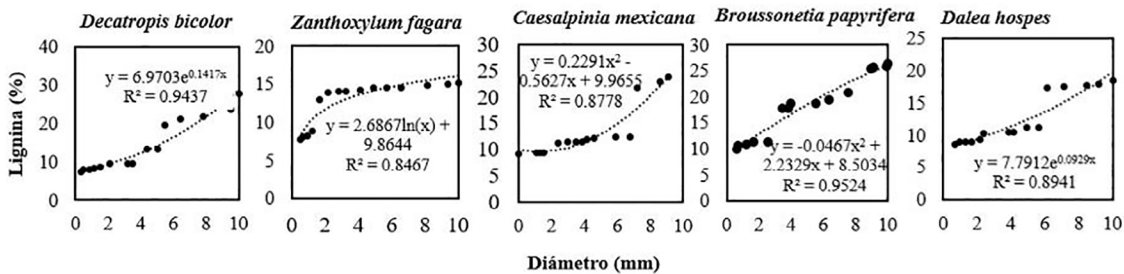


Figura 5. Modelos de regresión para la relación del contenido de lignina como función del diámetro de raíces en diferentes especies arbustivas, n = 25.

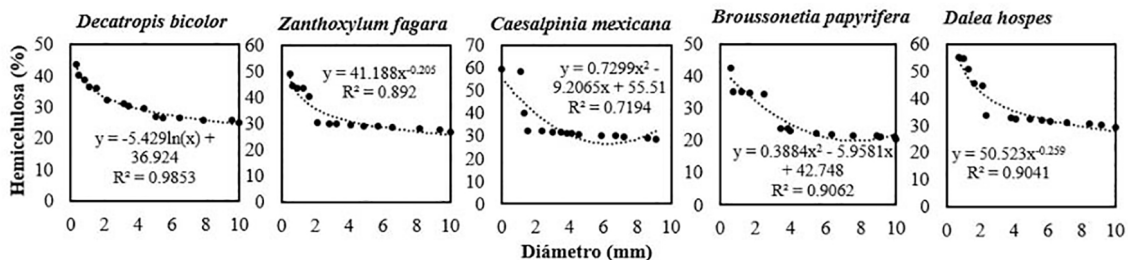


Figura 6. Modelos de regresión entre la hemicelulosa y el diámetro de las raíces en diferentes especies arbustivas, n = 25.

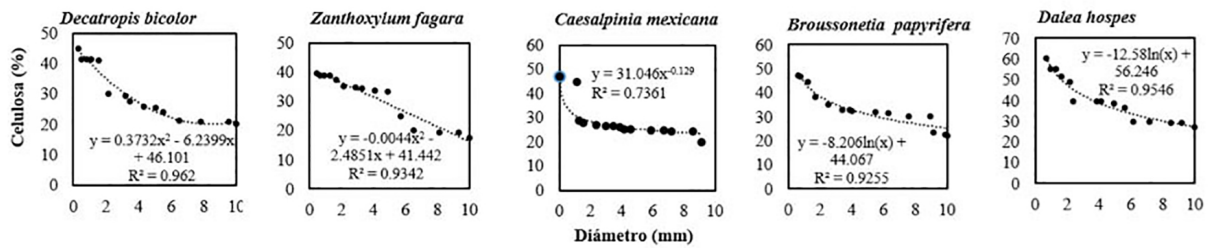


Figura 7. Modelos de regresión entre el contenido de celulosa y el diámetro de las raíces en diferentes especies arbustivas, n = 25.

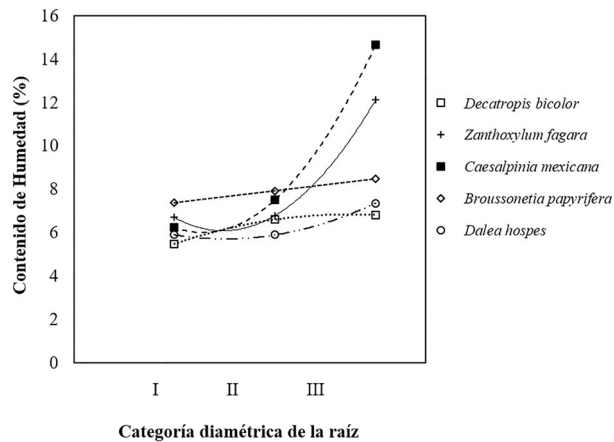


Figura 8. Relación del contenido de humedad de la raíz en cinco especies arbustivas respecto a la clasificación diamétrica de la raíz: categoría III (6.1 a 9.9 mm), categoría II (2.9 a 6.0 mm) y categoría I (0.1 a 2.9 mm).

Correlaciones entre las variables. Las correlaciones de Spearman para las variables lignina, hemicelulosa y celulosa se presentan en el [Tabla 3](#). La lignina presentó una correlación negativa y altamente significativa con hemicelulosa y celulosa. La hemicelulosa se correlacionó positiva y altamente significativa con la celulosa.

Morfología de las raíces. Para entender mejor los procesos que rigen la fijación del suelo, se analizaron tres clases de tipos de raíces dependiendo de su morfología radical. Las raíces fueron clasificadas de acuerdo con la propuesta de Styczen & Morgan (1994). En el [Tabla 4](#), en la columna de morfología, la línea oscura representa la superficie de suelo y la línea punteada representa la profundidad donde la raíz presenta su máximo desarrollo. *Decatropis bicolor* (Tipo M) mostró una profundidad de 29 cm, *Zanthoxylum fagara* (Tipo VH) de 36 cm, *Caesalpinia mexicana* (Tipo VH) de 58 cm, *Broussonetia papyrifera* (Tipo H) 45 cm y *Dalea hospes* (Tipo M) 19 cm.

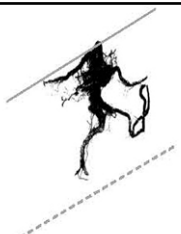

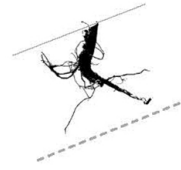
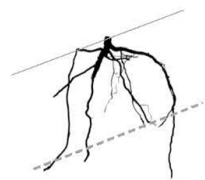
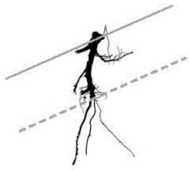

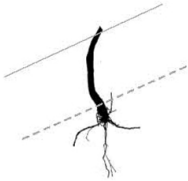
Tabla 3. Coeficientes de correlación de Spearman (n = 75) para las variables lignina, hemicelulosa y celulosa.

Variable	Lignina	Hemicelulosa	Celulosa
Lignina	1		
Hemicelulosa	-0.906**	1	
Celulosa	-0.736**	0.769**	1

**Correlación altamente significativa ($P < 0.01$).

Distribución de las especies nativas en una ladera. De acuerdo con los resultados de la composición química y morfología de raíces de las cinco especies nativas estudiadas, se procedió a diseñar un sistema de revegetación para fijación del suelo en una ladera típica de la Sierra Madre Oriental en el noreste de México ([Figura 9](#)).

Tabla 4. Descripción y caracterización morfológica radical de cada una de las especies estudiadas bajo la metodología de Styczen & Morgan (1994).

	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	
Desarrollo de raíz en los primeros 60 cm, extensión lateral amplia.	<i>Broussonetia papyrifera</i>	Moraceae	H	
Tipo VH Raíz primaria pivotante fuerte y profunda.	<i>Zanthoxylum fagara</i>	Rutaceae	VH	
	<i>Caesalpinia mexicana</i>	Fabaceae	VH	

Discusión

Los resultados mostraron que para el rango de diámetro de 0.1 a 2.9 mm (categoría diamétrica I), los porcentajes de celulosa son mayores. Lo anteriormente expuesto sugiere que para raíces de diámetros menores existe una mayor proporción de tejido primario en sus paredes celulares (Carpita & McCann 2015). Si bien, aunque es cierto que la composición química de la pared celular varía en función del estado de maduración de la célula, autores señalan que la pared primaria está constituida principalmente por celulosa, hemicelulosa y pectina (Höfte & Voxeur 2017, Chunchu *et al.* 2019).

Dentro de este marco y a partir de los resultados obtenidos, la tendencia fue similar para todas las especies; los porcentajes de celulosa se incrementaron al disminuir el diámetro de la raíz. Genet *et al.* (2005) y Hales *et al.* (2009) documentan que las raíces de diámetros finos son altamente resistentes a la tensión. Partiendo de este razonamiento, Genet *et al.* (2005) sugieren que esta categoría diamétrica presenta altos valores de fuerza de tensión debido a su alto contenido de celulosa. La fuerza de tensión de una raíz es controlada por su composición química (Genet *et al.* 2005), especialmente por las moléculas celulósicas, por tanto, se espera que raíces que se encuentre dentro de la categoría diamétrica I puedan proveer una óptima fijación al suelo. En tal sentido se propone las especies *Dalea hospes* (60.34 %), seguida por *Broussonetia papyrifera* (47.16 %), por sus contenidos de celulosa.

La tendencia de los contenidos de celulosa y lignina observados en la presente investigación fue similar a los encontrados por Genet *et al.* (2006), pero contrastantes con Thomas *et al.* (2014) en donde establecen que las raíces finas exhiben bajos porcentajes de celulosa, pero altos valores de lignina. Esta relación encontrada probablemente corresponda a las diferencias en el método aplicado, ya que ellos utilizaron el método modificado conforme a Brendel *et al.* (2000) para cuantificar los contenidos de celulosa, en donde el proceso de extracción produce celulosa pura y el método de Bromuro de Acetilo (AB) para cuantificar los contenidos de lignina. Además, no retiraron la corteza de las muestras de raíz y probablemente utilizaron una clasificación diamétrica diferente (Thomas *et al.* 2014). En el presente estudio, se utilizó el método desarrollado por Van Soest *et al.* (1991). Adicionalmente, se retiró la corteza en cada muestra de raíz, tomando en cuenta la metodología de Genet *et al.* (2005). Aunque no ha sido bien estudiado si la corteza de la raíz pueda afectar los contenidos químicos en la muestra, Yang *et al.* (2016) encontraron que las raíces sin corteza tenían mayores proporciones de lignina-celulosa en comparación con raíces con corteza.

El comportamiento de la lignina fue contrario al de la celulosa. La celulosa presentó mayores porcentajes en raíces de diámetro fino (0.1 a 2.9 mm), en cambio los porcentajes de lignina aumentaron a medida que el diámetro se incrementaba. La fijación del suelo por la raíz generalmente se ha correlacionado con los contenidos de celulosa en lugar de los contenidos de lignina. Sin embargo, Klautitz *et al.* (1947) observaron que la lignina parecía contribuir a la fijación de suelo, pero a altos contenidos de humedad. En el presente estudio, se encontró que las raíces de las

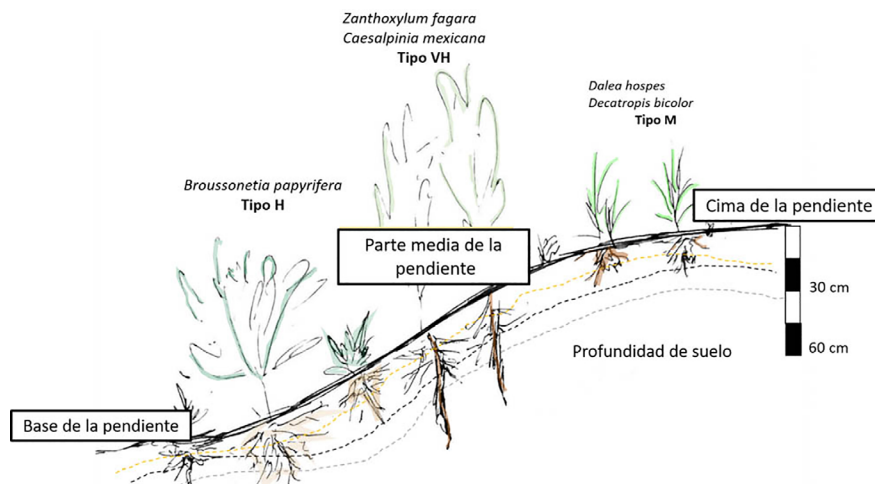


Figura 9. Representación de un sistema de revegetación con especies nativas, respecto a su sistema radical y composición química para fijación del suelo en una ladera típica de la Sierra Madre Oriental.

especies *Caesalpinia mexicana* y *Zanthoxylum fagara* mostraron porcentajes altos de humedad en la categoría diamétrica de 6.0 -9.9 mm. *Caesalpinia mexicana* presentó el valor más alto de humedad con 14.66 % y *Z. fagara* con 12.13 %. *Decatropis bicolor* y *Broussonetia papyrifera* mostraron mayor homogeneidad en cuanto al contenido de humedad de la raíz para las tres categorías diamétricas. Los porcentajes para *Decatropis bicolor* variaron de 5.48 % para la categoría I (0.1 a 2.9 mm) a 6.82 % para la categoría III (6.1 a 9.9 mm). Los porcentajes para *Broussonetia papyrifera* variaron de 7.38 % para la categoría I a 8.50 % para la categoría III (6.1 a 9.9 mm). Cabe mencionar que estas especies fueron también las que mostraron mayores porcentajes de lignina. Todas las especies manifestaron un comportamiento similar; los contenidos de humedad en la raíz parecían aumentar en la categoría diamétrica III (6.1 a 9.9 mm). En este contexto, cabe indicar que los porcentajes más altos de lignina para todas las especies se encontraron también en los diámetros de la categoría III (6.1 a 9.9 mm).

En el presente estudio se encontró que los individuos muestreados a mayor altitud en promedio presentaban mayores porcentajes de lignina. Esta relación se encontró para las especies *Broussonetia papyrifera* y *Decatropis bicolor*, siendo las especies que mostraron las mayores proporciones de lignina; *D. bicolor* con 27.73 % y *B. papyrifera* con un porcentaje ligeramente menor de 26.41 %. Estas especies se colectaron en los puntos más altos de los sitios de muestreo, a altitudes de 3,304 y 3,296 m snm. El resto de las especies se distribuyeron dentro de un rango de 2,000 m snm, siendo visible el descenso en los contenidos de lignina. Esto puede ser más evidente en *Zanthoxylum fagara* que a 2,621 m snm, disminuyeron sus contenidos a 15.08 %. Los resultados fueron comparables con otros autores donde demostraron que el resultado de la altitud tiene un efecto importante sobre la lignificación. Gindl *et al.* (2001) explicaron que los árboles que crecen a mayores altitudes compensan sus paredes celulares delgadas con un contenido mayor de lignina. Dichos autores observaron un mayor contenido de lignina en la madera del abeto de Noruega (*Picea abies*) a medida que aumentaba la elevación. Scippa *et al.* (2006), encontraron que las especies que crecen en laderas mostraban proporciones de lignina significativamente mayores en comparación de las que crecen en terreno plano. Este aumento de producción de lignina está asociado a la respuesta de la planta ante el estrés mecánico (Scippa *et al.* 2006).

La hemicelulosa por otro lado mantuvo una tendencia similar a la celulosa. Esto principalmente porque las hemicelulosas son polisacáridos que se encuentran unidos a la celulosa presente en las paredes celulares. Por tanto, la cantidad obtenida al final del experimento representa tanto celulosa como hemicelulosa. Ambos porcentajes químicos aumentaron al disminuir el diámetro en raíces finas y delgadas (Genet *et al.* 2010). Respecto al diámetro, Carpita *et al.* (2015) mencionan que las raíces de diámetros finos proveen una óptima fijación al suelo, debido al crecimiento primario que presenta la pared celular de las raíces, compuesta principalmente por moléculas de celulosa.

La contribución de las raíces a la fijación del suelo depende no solo de las características individuales y de la interacción suelo-raíz, sino también de toda la arquitectura del sistema radical (Reubens *et al.* 2007). Cada especie desarrolla un patrón de enraizamiento diferente dependiendo de las condiciones del sitio de crecimiento. Aunque, la morfología de la raíz es uno de los factores más importantes que proporcionan anclaje y fijación al suelo (Dupuy *et al.* 2007), la condición del suelo puede modificar la morfología del sistema radical. De esta manera, la composición química de la raíz se ve ligada a su entorno local y de ahí las variaciones que esta pudiera presentar (Genet *et al.* 2005). Los principales factores que influyen en la fijación del suelo y que se analizaron en este estudio fueron la forma, tamaño y contenidos químicos de raíces. Como la fuerza de tensión incrementa con el decremento del diámetro de la raíz (Genet *et al.* 2005), una gran cantidad de raíces finas y delgadas fijarían mejor el suelo que raíces gruesas. Esto principalmente debido al aumento en los contenidos de celulosa en diámetros finos en la raíz.

Las especies donde su sistema radical presentan raíces centrales y largas fijarán el suelo en la parte media de la pendiente, debido a la profundidad que exponen sus raíces (Figura 9) (Stokes *et al.* 2008). Por otro lado, las especies donde su sistema radical presenta raíces oblicuas, densas y poco profundas, fijará la pendiente tanto en las partes superiores como inferiores de manera efectiva (Danjon *et al.* 2008). *Zanthoxylum fagara* y *Caesalpinia mexicana* presentaron raíces profundas (aproximadamente 60 cm de profundidad desde la superficie de suelo) y verticales. Por tanto, estas especies presentan características que las vuelven potencialmente aptas para ser usadas en la parte media de una pendiente. Estas especies corresponden según la clasificación de Styczen & Morgan (1994), al tipo de raíz VH. Cabe considerar que un menor aporte a la fijación al suelo viene asociado a la falta de raíces laterales.

Por otra parte, *Decatropis bicolor*, *Dalea hospes* y *Broussonetia papyrifera* presentaron raíces de máximo 45 cm de profundidad y la mayor densidad de raíces se encontraba cerca de la superficie de suelo. Por tanto, estas especies tendrían mayor efectividad si se encuentran en las partes superiores e inferiores de la pendiente, que en la parte media. Estas especies corresponden según la clasificación, a los tipos de raíz M y H.

La capacidad de fijación de las raíces al suelo depende de diversos factores, incluyendo la especie, las condiciones ambientales, experimentales y edad (Stokes *et al.* 2009). Sin embargo, las propiedades químicas de la raíz representan una característica importante en respuesta a la fijación de suelo. Por tanto, a partir de los resultados de composición química y morfología se propone que los tipos de sistemas radicales M y H, desempeñan un papel significativo, principalmente por el refuerzo que viene asociado a sus contenidos de celulosa. A este punto, cabe precisar que la lignina sigue siendo un componente importante al momento de proporcionar fijación al suelo, debido a que representa una característica integral que garantiza la función adecuada de otros tipos de células en los diferentes órganos de la planta (Barros *et al.* 2015). Además, la lignina se ha considerado como un mecanismo de defensa contra el ingreso de fitopatógenos a la planta, limitando la difusión de toxinas secretadas por el patógeno. El aumento y deposición de material lignificado se produce cuando las plantas son sometidas a tipos de estrés bióticos o abióticos (Zavaleta-Fortiz & Lagunes-Mejía 2016).

La potencialidad del uso de las especies estudiadas para la fijación del suelo está vinculada a sus características morfológicas (orientación y ángulos) y la cantidad de raíces pequeñas que presenta el sistema radical de cada individuo (categoría diamétrica I: 0.1 a 2.9 mm). La arquitectura de un sistema radical con raíces principales y raíces laterales principales largas como horizontales, sería un modelo estratégico para la fijación de suelo en un proyecto de revegetación dependiendo de su ubicación en la ladera. *Dalea hospes* y *Decatropis bicolor* (Tipo M) localizadas en la cima de la pendiente, *Zanthoxylum fagara* y *Caesalpinia mexicana* (Tipo VH) en la parte media y *Broussonetia papyrifera* (Tipo H) en la base de la pendiente.

El orden de importancia en cuanto al contenido de celulosa y su uso potencial para la protección de laderas fue: *Dalea hospes* > *Broussonetia papyrifera* > *Caesalpinia mexicana* > *Decatropis bicolor* > *Zanthoxylum fagara*. En un sistema radical, que cuente tanto con raíces principales como con raíces laterales propiciaría un mejor anclaje, debido a la relación que existe entre el diámetro respecto a la composición química de la raíz y la fuerza de tensión. Los resultados del presente estudio aportan información referente a que una mayor fijación al suelo estaría asociado a la morfología del sistema radical, diámetro de la raíz y composición química. En general, la morfología del sistema radical es uno de los componentes principales para resistir el desarraigo de una planta en un deslizamiento somero de suelo. El éxito del uso de estas soluciones dependerá en gran medida de las especies seleccionadas y las condiciones específicas del sitio.

Agradecimientos

Se agradecen las facilidades prestadas por el Laboratorio de Química de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Así como también, las retroalimentaciones de revisores anónimos por sus acertados comentarios y observaciones.

Literatura citada

- Alanís-Rodríguez E, Jiménez-Pérez J, Pando-Moreno M, Aguirre-Calderón O, Treviño-Garza E, Canizales-Velázquez P. 2010. Analysis of the arboreal diversity in restaurated after-fire areas in the Ecological Park Chipinque, Mexico. *Acta Biológica Colombiana* 5: 309-324.
- Alanís GM, González M, Guzmán YG, Cano G. 1995. Flora Representativa de Chipinque: árboles y arbustos, 1ª parte. *Universidad Autónoma de Nuevo León*. 1-40
- Alvarado V, Bermúdez-Rojas T, Romero-Vargas M, Piedra-Castro L. 2014. 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>

- 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>
- Brendel O, Iannetta M, 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)
- Carpita NC, Ralph J, McCann MC. 2015. The cell wall. In: Buchanan B, Gruissem W, Jones R. eds. *Biochemistry and Molecular Biology of Plants*, Maryland: American Society of Plant Biologists, Rockville, pp. 45-110. ISBN: 978-0-470-71421-8
- Chapa-Guerrero JR, Méndez-Delgado S, Chávez-Cabello G, Chapa-Arce RI, Ibarra-Martínez SE. 2016. Movimientos en masa, un riesgo geológico latente en el área metropolitana de Monterrey, N.L., México. *Ciencia UANL* **19**: 41-45.
- Chuncho G, Chunco C, Aguirre Z. 2019. *Anatomía y morfología vegetal*. Loja, Ecuador: Universidad Nacional de Loja. ISBN-978-9978-355-57-2
- 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>
- Dupuy L, Fourcaud T, Stokes A. 2007. A numerical investigation into the influence of soil type and root architecture on tree anchorage. In: Stokes A, Spanos I, Norris JE, Cammeraat E. eds. *Eco-and Ground Bio-Engineering: The Use of Vegetation to Improve Slope Stability*. Dordrecht: Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5593-5_17
- Estrada-Castillón AE. 1998. *Ecología del matorral submontano en el estado de Nuevo León, México*. PhD Thesis. Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Faisal A. 2010. Use of vegetation for slope protection: Root mechanical properties of some tropical plants. *International Journal of Physical Sciences* **5**: 496-506.
- Flora of North America Editorial Committee. 1993. *Flora of North America: Magnoliophyta: Commelinidae (in Part), Cyperaceae (Vol. 23)*. New York, USA: Oxford University Press. ISBN 978-0-19-515207-4
- García-Bastida M. 2013. *Aspectos ecológicos de Gerrhonotus infernalis (Sauria: Anguidae) en el Parque Ecológico Chipinque, San Pedro Garza García, Nuevo León, México*. PhD. Thesis. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- García E. 2004. *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)*. México: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. ISBN: 970-32-1010-4
- 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, Mickovski S, Fourcaud T, Dumail J, Van Beek R. 2005. The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots. *Plant and Soil* **278**: 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-005-8768-6>
- Genet M, Stokes A, Fourcaud T, Cai X, Lu Y. 2006. Soil fixation by tree roots: Changes in root reinforcement parameters with age in *Cryptomeria japonica* D. Don plantations. In: Marui H. ed. *INTERPRAEVENT 2006: Disaster Mitigation of Debris Flows, Slope Failures and Landslides*. Tokyo, Japan: Universal Academy Press. pp. 535-542. ISBN: 4-946443-98-3
- 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>
- 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>
- Höfte H, Voxeur A. 2017. Plant cell walls. *Current Biology* **27**: R865-R870. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.05.025>
- Klauditz W, Marschall A, Ginzler W. 1947. Zur Technologie verholzter pflanzlicher Zellwände. *Holzforschung* **4**: 98-103. DOI: <https://doi.org/10.1515/hfsg.1947.1.4.98>
- 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.

- Sánchez-Castillo L, Kubota T, Cantú-Silva I, Yáñez-Díaz M, Hasnawir, Pequeño-Ledezma M. 2017. Comparisons of the root mechanical properties of three native Mexican tree species for soil bioengineering practices. *Botanical Sciences* **95**: 259-269. DOI: <https://doi.org/10.17129/botsci.802>
- 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>
- Segura F, Echeverri R, LI A, CP, Mejía AI. 2007. Descripción y discusión acerca de los métodos de análisis de fibra y del valor nutricional de forrajes y alimentos para animales. *Vitae* **14**: 72-81.
- 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 GB, Fourcaud T, Giadrossich F, Gillies C, Hubble T, Kim JH, Loades KW, Mao Z, Mclvor IR, Mickovski SB, Mitchell S, Osman N, Phillips C, Poesen J, Polster D, Preti F, Raymond P, Rey F, Schwarz M, Walker LR. 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, Norris JE, Van Beek LPH, Bogaard T, Cammeraat E, Mickovski SB, Jenner A, di Iorio A, Fourcaud T. 2008. How vegetation reinforces soil on slopes, Slope stability and erosion control ecotechnological solutions. In: Norris JE, Stokes A, Mickovski SB, Cammeraat E, van Beek R, Nicoll BC, Achim A. eds. *Slope Stability and Erosion Control: Ecotechnological Solutions*. Dordrecht: Springer Netherlands. pp. 65-118. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6676-4_4
- Styczen ME, Morgan RPC. 1994. Engineering properties of vegetation. In: Morgan RPC, Rickson RJ. eds. *Slope Stabilization and Erosion Control: A Bioengineering Approach*. London, UK: Taylor y Francis. pp. 5-58. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780203362136>
- 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>
- 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.
- Van Soest PV, Robertson JB, Lewis BA. 1991. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, **74**: 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)
- 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-González R, Cantú-Silva I, Sánchez-Castillo 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>
- Zavaleta-Mejía E, Lagunes-Fortiz E. 2016. Función de la lignina en la interacción planta-nematodos endoparásitos sedentarios. *Revista Mexicana de Fitopatología* **34**: 43-63. DOI: <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.1506-7>

Editor de sección: Miguel Olvera

Contribución de los autores: BFV: diseño del experimento, colecta de muestras, trabajo de laboratorio y redacción del manuscrito. RZG, colecta de muestras, diseño de figuras, análisis estadístico y revisión del manuscrito. ICS, diseño del experimento, análisis estadístico y revisión del manuscrito. HGR, revisión del manuscrito y análisis de datos.