



# Atributos de las **especies arbóreas** y su carbono almacenado en la vegetación del municipio de Querétaro, México

## Attributes of tree species and their capability of carbon capture in the municipality of Querétaro, México

José Carmen Soto-Correa<sup>1</sup>, Víctor Hugo Cambrón-Sandoval<sup>1\*</sup> y Rebeca Renaud-Rangel<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de Ciencias Naturales. Juriquilla, Querétaro, Qro., México.

\* Autor de correspondencia.  
hugo.cambron@gmail.com

### RESUMEN

Se describen atributos de especies arbustivas y arbóreas, componentes del bosque tropical caducifolio dentro del Municipio de Querétaro, Querétaro. Se utilizó un muestreo aleatorio de 36 sitios de vegetación natural con criterios de exclusión. Para cada sitio se delimitó un cuadrante de 25 m × 25 m. Dentro del cuadrante se identificaron y evaluaron el total de especies arbóreas y arbustivas mayores a 150 cm de altura, excluyendo especies de cactáceas y suculentas. Se evaluaron atributos de los árboles como: diámetro basal, diámetro a la altura del pecho, altura total del árbol, altura de la copa, diámetro de copa y se estimó la capacidad de captura de carbono por especie considerando las variables climáticas del sitio donde crecen. Se observaron 22 especies de arbustos y árboles dentro las que destacan por su abundancia: *Acacia schaffneri*, *Bursera fagaroides*, *Forestiera phillyreoides*, *Karwinskia humboldtiana*, *Dodonaea viscosa* e *Ipomea murucoides*, mientras las que presentan mayor potencial de almacenar carbono son: *Prosopis laevigata* y *Leucaena leucocephala*; en contraparte, las menos abundantes fueron: *Randia thurberi* y *Erythrina coralloides*. Estos resultados son indispensables para el desarrollo y diseño de propuestas de conservación y reforestación del bosque tropical caducifolio.

PALABRAS CLAVE: árboles, atributos de crecimiento, biomasa, bosque tropical caducifolio, diversidad de especies.

### ABSTRACT

Attributes of the shrub and tree species components of the tropical deciduous forest within the Municipality of Querétaro, Querétaro are described. We used a random sampling of 36 sites of natural vegetation with exclusion criteria. Sites were delimited to a 25 m × 25 m quadrant. Within the quadrant, the species of all individuals of the tree and shrub species greater than 150 cm were identified, not taking into account the Cactaceae and Succulents. Measurements were made of the trees: basal diameter, diameter at breast height, total tree height, canopy height and diameter; carbon capture by species was estimated taking into account the climatic site variables, where they grow. Twenty-two species of shrubs and trees were observed, with *Acacia schaffneri*, *Bursera fagaroides*, *Forestiera phillyreoides*, *Karwinskia humboldtiana*, *Dodonaea viscosa* and *Ipomea murucoides* being the most abundant, while the ones with the highest carbon content are species such as: *Prosopis laevigata* and *Leucaena leucocephala* and the less abundant were *Randia thurberi* and *Erythrina coralloides*. These results are indispensable for developing and designing proposals for reforestation and conservation of the tropical deciduous forest.

KEYWORDS: trees, growth attributes, biomass, tropical deciduous forest, species diversity.

## INTRODUCCIÓN

El bosque tropical caducifolio (BTC) en México es también llamado: selva baja decidua (Miranda, 1952), selva baja caducifolia (Flores, Jiménez, Madrigal, Moncayo y Takaki, 1971; Miranda y Hernández, 1963; Pennington y Sarukhan, 2005; Rzedowski, 1991) y bosque tropical deciduo (Rzedowski, 1996). El BTC en México contiene 31% de carbono almacenado (Becerril-Piña, Gonzáles-Sosa y Hernández-Sandoval, 2007). Se caracteriza por ser rico en especies arbóreas que operan en los distintos servicios del ecosistema (Cuevas, Núñez, Guzmán y Santana, 1998; Sánchez-Velásquez *et al.*, 2002), como son: contribución a la regulación de la ocurrencia de temperaturas extremas altas en la temporada de seca (Ledesma-Colunga, Cambrón-Sandoval, Suzán-Azpiri, Guevara-Escoba y Luna-Soria, 2015) y capacidad de almacén de carbono (Chave *et al.*, 2005). La diversidad de especies tiene un papel importante en los servicios ambientales que ofrece el bosque al presentar una relación; diversidad de especies con la capacidad de ofrecer servicios asociados a la regulación climática (Balvanera *et al.*, 2006; Cardinale *et al.*, 2011; Quijas, Schmid y Balvanera, 2010) y almacenamiento de carbono (Balvanera *et al.*, 2006; Potvin y Gotelli, 2008; Ruiz-Jaen y Potvin, 2010).

Este tipo de bosques, además de ser diverso en especies de árboles, presenta una amplia gama de atributos como son la formas y tamaños, arquitectura de crecimiento específica de cada especie y árbol, que pueden ser útiles para un posible manejo, además de estar relacionados con los predictores de la biomasa de cada árbol, que se puede calcular con ayuda de ecuaciones alométricas comúnmente utilizadas para estimar la biomasa a escala individual o comunitaria (Zhao, Popescu y Nelson, 2009, Sullivan, Ducey, Orwig, Cook y Palace, 2017).

Se ha documentado la casi desaparición del BTC en la región Bajío de México (Rzedowski y Calderon, 1987), pero el estado actual es incierto (Trejo y Dirzo, 2000). El estado de Querétaro es parte de la región Bajío, donde existe una fuerte presión de cambio de uso de suelo por las empresas constructoras. Esta intensa actividad representa repercusiones significativas en la disminución de la

superficie del BTC típico de la región bajío (Hernández-Vargas, Sánchez-Velásquez, Carmona-Valdovinos, Pineda-López y Cuevas-Guzmán, 2000; Sánchez-Velásquez *et al.*, 2002; Stork y Samways, 1995). La disminución del bosque puede traer consigo la pérdida de especies de árboles con usos potenciales con beneficios económico y ecológico, usos que hoy en día son desconocidos o poco aprovechados y que pueden ser una alternativa en el futuro.

Los bosques y cada especie de árbol son de suma importancia, debido a que son trascendentales para mitigar el daño ocasionado por el uso de combustibles fósiles, principales gases causantes del cambio climático global (Becerril-Piña, Gonzáles-Sosa y Hernández-Sandoval, 2007; Ordóñez y Masera, 2001). Estos bosques además de contener carbono almacenado siguen participando en la fijación carbono atmosférico (CO<sub>2</sub>) (Becerril-Piña, Gonzáles-Sosa E. y Hernández-Sandoval, 2007; Gasparri y Manghi, 2004)

Conocer las principales especies de árboles que componen el BTC típico de cada región en México, su abundancia, las características de cada especie y la capacidad de captura de carbono almacenado en cada árbol es de suma importancia. Al generar un antecedente, influye en la toma de decisiones para la elaboración de estrategias de conservación y manejo a escala de especie, como por ejemplo en los inventarios de la vegetación arbórea, además de identificar y contabilizar las especies en sitios específicos. Hoy en día, ese conocimiento también ha permitido valorar diversos servicios ambientales a través de la evaluación de los atributos de las especies; uno de ellos es la capacidad de almacenamiento de carbono mediante la estimación de la biomasa aérea de los árboles (Chave *et al.*, 2004; Gracia, Vayreda, Sabaté e Ibáñez, 2004; Houghton, 2003). Cabe mencionar que la biomasa de un árbol en promedio es de 46% de carbono, del cual 86% en su mayoría se encuentra en el fuste (Avenidaño, Acosta, Carrillo y Etchevers, 2009).

Para la estimación de biomasa se recomienda utilizar modelos de regresión específicos para especies de árboles tropicales, donde se proponen modelos basados en atributos de crecimiento de los arboles (altura, DAP, diámetro basal, densidad de la madera) integrando las



variables climáticas del sitio donde habitan (temperatura, precipitación e índice de aridez), estos parámetros reducen el grado de error de la estimación de carbono (Chave *et al.*, 2004; Chave *et al.*, 2005). Se considera que la relación diámetro-altura del árbol depende linealmente de una variable de estrés bioclimático que incluye los índices de variabilidad de la temperatura, variabilidad de la precipitación y la intensidad de la sequía, que permite la comparación entre árboles de una especie y entre especies (Bauer, Apps, Bhatti y Lal, 2006; Chave *et al.*, 2014). Con este estudio se pretende contribuir al conocimiento específico de la composición, la diversidad y el carbono almacenado de árboles y arbustos, información que pueda ser aplicada en la planeación de actividades de reforestación y conservación del BTC típico del municipio de Querétaro, así como en los programas de pago de servicios ambientales por almacenamiento de carbono (Ávila, Jiménez, Beer, Gómez e Ibrahim, 2001; Chomitz, Buys, De Luca, Thomas y Wertz-Kanounnikoff, 2007; Esquivel, 2016). Se describen atributos de composición del BTC y se aporta información sobre los atributos específicos de las especies de árboles y arbustos que lo componen, atributos que se recomienda sean considerados en la planificación de la normativa para la reforestación o conservación, dependiendo de la necesidad y el objetivo. Por ejemplo, se proporciona información de especies con mayor capacidad de captura de carbono, si el objetivo de un programa de reforestación o conservación en ambientes típicos de BTC fuera incrementar la capacidad de captura de carbono; lo anterior contribuye a la selección de especies con características idóneas para aumentar la captura de carbono (Chave *et al.*, 2005), debido que en múltiples ocasiones la reforestación del bosque tropical caducifolio presenta dificultad para conformar un ensamble ecológico con el total de especies presentes.

## OBJETIVOS

Identificar las principales especies de árboles y arbustos del bosque tropical caducifolio del municipio de Querétaro, Qro., así como los diferenciales en abundancia y atributos de crecimiento entre especies presentes en él.

Estimar la biomasa y el carbono almacenado en dicho BTC, con ayuda de la ecuación alométrica propuesta por Chave *et al.* (2005; 2014) e integrando los atributos de los árboles y arbustos a escala de especies y las variables climáticas específicas de los sitios donde habitan.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Descripción del área de estudio

El sitio de estudio se localiza en el municipio de Querétaro, Querétaro (Fig. 1), México, dentro de las coordenadas extremas 20° 31' a 20° 56' de latitud norte y de 100° 19' a 100° 36' de longitud oeste. El área de estudio cuenta con vegetación predominante del bosque tropical caducifolio: bosque caducifolio espinoso (41 500 ha), bosque esclerófilo caducifolio (20 875 ha), pastizal mediano abierto (21 575 ha) y matorral crasicraule (17 750 ha) (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi], 2014). El clima del municipio es templado semi-seco, caracterizado por un verano cálido. La temperatura media anual es de 18° C. Los meses más calurosos son mayo y junio. La precipitación pluvial anual promedio es de 555 mm (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, [Inafed], 2010). La recolección de datos se realizó en el periodo de enero a julio del 2016, utilizando un sistema aleatorio de selección de puntos.

### Selección de cuadrantes de muestreo

Los 36 sitios de muestreo se seleccionaron de forma aleatoria a partir de una matriz de coordenadas geográficas de ubicación de puntos distribuidos dentro del área del municipio de Querétaro (Tabla 1). Se utilizó el programa Arcmap 10 ©Esri, para la generación de coordenadas de sitios de muestreo aleatorio; al programa se le indicaron tres criterios de exclusión para la localización de los puntos de muestreo: 1) zona rural; 2) cada punto debe estar a 100 m de cualquier vialidad o/y casa habitación; 3) una distancia mínima de 200 m entre cada punto. Para este procedimiento, el programa utilizó una capa de vegetación y uso de suelo serie V del Inegi (2014), en la cual se clasifica de manera más específica el uso de suelo (Tabla 1).

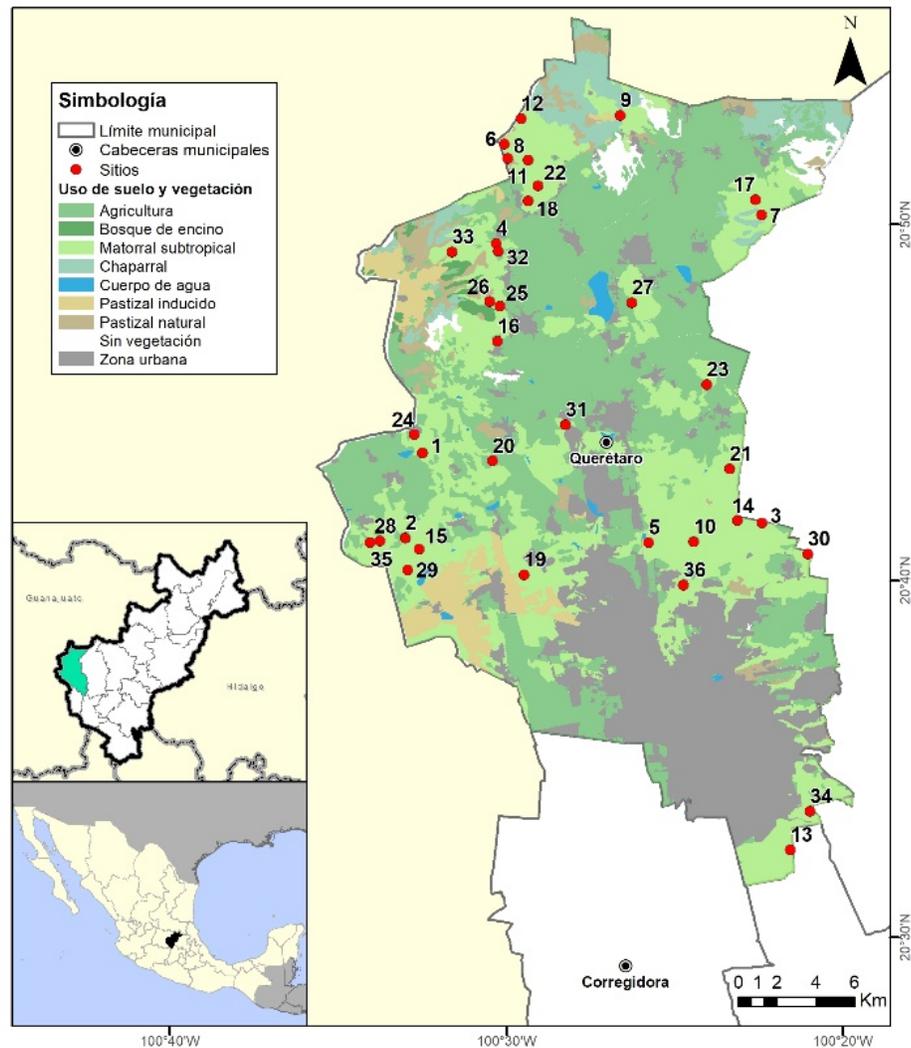


FIGURA 1. Localización de sitio de estudio y puntos de muestreo dentro del municipio de Querétaro, Qro.

### Modelación climática

La variabilidad climática contemporánea (1961-1991) de cada punto seleccionado se estimó las variables climáticas de temperatura media anual (MAT), precipitación media anual (MAP), balance de precipitación primavera/verano (smrpb (precipitación de julio + agosto / precipitación de abril y mayo)) e índice anual de aridez (IAA =  $(DD5^{0.5})/PMA$ ;  $DD5$  = grados día > 5 °C). La estimación del clima futuro (2030) se realizó a partir de modelos establecidos por Edenhofer (2014), utilizando el modelo A1B (modelo intermedio; A altas emisiones y B bajas emisiones carbono escenario) (Crookston, 2010 y 2014) (Tabla 1),

posteriormente ajustando el modelo en ANUSPLINE (Sáenz-Romero *et al.*, 2010; Crookston, 2010). También se estimó la variabilidad de la temperatura máxima y mínima temperatura anual por sitio ( $\Delta T$  (°C)). Las variables climáticas se obtuvieron mediante los modelos climáticos desarrollados para México (Crookston, 2010), los cuales se basan en la transposición de superficies de datos climáticos mensuales normalizados de temperatura (mínima, media y máxima) y precipitación, obtenidos de aproximadamente 4000 estaciones climatológicas en el sur de Estados Unidos, México, Guatemala, Honduras y Cuba mediante el software ANUSPLINE 4.0.



TABLA 1. Ubicación y descripción climática contemporánea (1961-1991) y futura (2030) de los sitios de muestreo del BTC del municipio de Querétaro, Qro.

Sitio	Longitud O (Grados)	Latitud N (Grados)	Altitud (m)	MAT (°C)		MAP (mm)		IAA		$\Delta T$ (°C)	smp <b>pb</b> (mm)
				Cont	2030	Cont	2030	Cont	2030	Cont	Cont
1	100.3218'	20.4666'	2317	15.7	17.2	709	629	0.088	0.106	11.3	2.2
2	100.2643'	20.4811'	2209	16.2	17.7	685	607	0.093	0.112	11.5	1.9
3	100.3186'	20.4331'	2218	16.2	17.7	696	617	0.092	0.110	11.6	2.1
4	100.2655'	20.4839'	2183	16.3	17.8	679	603	0.095	0.113	11.6	2
5	100.2623'	20.5286'	2184	16.4	17.8	666	591	0.096	0.115	11.8	2.2
6	100.2455'	20.4466'	2152	16.4	17.9	682	608	0.094	0.112	11.8	2.1
7	100.2107'	20.3993'	2133	16.4	17.9	692	613	0.093	0.111	11.9	2.1
8	100.221'	20.4129'	2118	16.5	18.0	686	608	0.094	0.113	11.9	2.1
9	100.2217'	20.4111'	2113	16.5	18.0	687	607	0.094	0.113	12.1	2.1
10	100.3931'	20.7108'	2226	16.6	18.1	586	524	0.111	0.131	12.1	2
11	100.2662'	20.4825'	2126	16.6	18.1	672	596	0.097	0.116	12.2	2.1
12	100.2836'	20.5182'	2116	16.7	18.2	659	586	0.099	0.118	12.2	2.1
13	100.2401'	20.4283'	2083	16.7	18.2	678	604	0.096	0.114	12.3	2.1
14	100.3199'	20.4288'	2094	16.8	18.2	681	603	0.096	0.115	12.2	2.1
15	100.2101'	20.3342'	2017	16.8	18.3	687	609	0.095	0.114	12.3	2.2
16	100.4474'	20.8839'	2241	16.8	18.3	490	443	0.134	0.157	12.4	2.1
17	100.2412'	20.4294'	2068	16.8	18.2	676	601	0.097	0.115	12.4	2.1
18	100.2292'	20.4038'	2046	16.8	18.3	680	602	0.096	0.115	12.3	2
19	100.33'	20.4159'	2060	16.9	18.4	679	604	0.097	0.115	12.5	2.2
20	100.4808'	20.8613'	2221	16.9	18.3	496	448	0.132	0.155	12.5	2.1
21	100.3021'	20.4297'	2057	16.9	18.4	676	600	0.097	0.116	12.5	2.1
22	100.3191'	20.4267'	2035	17.0	18.5	674	598	0.098	0.117	12.5	2.1
23	100.3304'	20.4144'	2038	17.0	18.5	677	603	0.098	0.116	12.6	2.1
24	100.3236'	20.4199'	2024	17.1	18.5	676	599	0.098	0.117	12.6	2.1
25	100.2149'	20.3811'	1948	17.1	18.6	668	591	0.099	0.119	12.5	2.1
26	100.2934'	20.4358'	2013	17.1	18.6	669	595	0.099	0.118	12.6	2
27	100.3036'	20.4268'	1989	17.2	18.6	669	594	0.099	0.118	12.8	2.1
28	100.4003'	20.7585'	2065	17.2	18.7	545	491	0.123	0.143	12.9	2.1
29	100.2212	20.3627'	1864	17.3	18.8	654	578	0.102	0.122	12.8	2
30	100.2701	20.4101'	1892	17.4	18.8	656	585	0.102	0.121	13	2
31	100.2757	20.4119'	1883	17.4	18.9	655	582	0.102	0.122	13	2
32	100.2836	20.3856'	1857	17.4	18.9	659	582	0.102	0.122	13	2.1
33	100.2995	20.409'	1914	17.4	18.8	665	589	0.101	0.120	13	2.1
34	100.2808	20.4115'	1888	17.4	18.9	656	582	0.102	0.122	13	2.1
35	100.3684	20.6228'	1959	17.5	19.0	604	539	0.111	0.132	13	2
36	100.3447	20.5886'	1925	17.6	19.0	614	548	0.110	0.130	13.5	2.1

MAT: Temperatura media anual, MAP: precipitación media anual, IAA: índice de aridez, Cont.: Clima contemporáneo, promedio 1961-1990, 2030: años 2030 (en un escenario intermedio CGCM3\_AIB\_2030),  $\Delta T$ : cambio de temperatura, smp**pb**: diferencial de precipitación.

### Localización, método de muestreo y medición de atributos

Se localizó y georreferenció cada sitio (Tabla 1). En cada punto de muestreo se delimitó un cuadrante de 25 m × 25 m utilizando una soga de 100 m. Dentro del cuadrante se identificó a las especies arbóreas y arbustivas (Martínez *et al.*, 2015; Rzedowski y Calderon, 1987), solo se evaluaron individuos que presentaran una altura superior a 150 cm para asegurarse que fueran arboles ya establecidos (no se consideraron cactáceas ni suculentas). Se evaluaron y estimaron variables e índices de diversidad como el de crecimiento de los árboles: diámetro basal, diámetro a la altura del pecho (DAP, suma de diámetros de todos los ejes principales del tallo a 1.30 m), altura total del árbol, altura de la copa, cobertura de copa, así como variables de arquitectura, de crecimiento como: tipo de fuste, tipo de copa e índices de Simpson, Shannon-Wiener y la determinación de carbono (Fig. 2) (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2004).

### Determinación de carbono almacenado

La ecuación alométrica para estimar biomasa aérea utilizada por Chave *et al.* (2005, ecuación 1) y Chave *et al.* (2014, ecuaciones 2 y 3), en donde se utiliza la relación diámetro-altura del árbol genérico, depende linealmente de una

variable de estrés bioclimático que incluye los índices de variabilidad de la temperatura, variabilidad de la precipitación, la intensidad de la sequía y la densidad de la madera, un predictor de biomasa (Chave *et al.*, 2015). La densidad de la madera de cada especie se obtuvo a través de bases publicadas en Verdusco (2016); Ordóñez *et al.* (2012); Ordóñez (2015); Villalón (1992), Chave *et al.* (2009) y Zanne *et al.* (2009), permitiendo la comparación de almacén de carbono entre especies.

$$BA = \rho \times \exp(-1.499 + 2.148 \ln(D) + 0.207 \ln^2(D) - 0.0281 \ln^3(D)) \quad [1]$$

$$BA = \exp(-1.803 - 0.976E + 0.976 \ln(\rho) + 2.673 \ln(D) - 0.0299 \ln^2(D)) \quad [2]$$

$$E = (0.178 \times \Delta T - 0.938 \times IAA - 6.61 \times smrb) \times 10^{-3} \quad [3]$$

donde:

BA = biomasa aérea

$\rho$  = densidad básica de las especies

D = diámetro a la altura del pecho (DAP)

E = estrés ambiental

$\Delta T$  = diferencial de temperatura

IAA = índice de aridez

smrbp = diferencial de precipitación

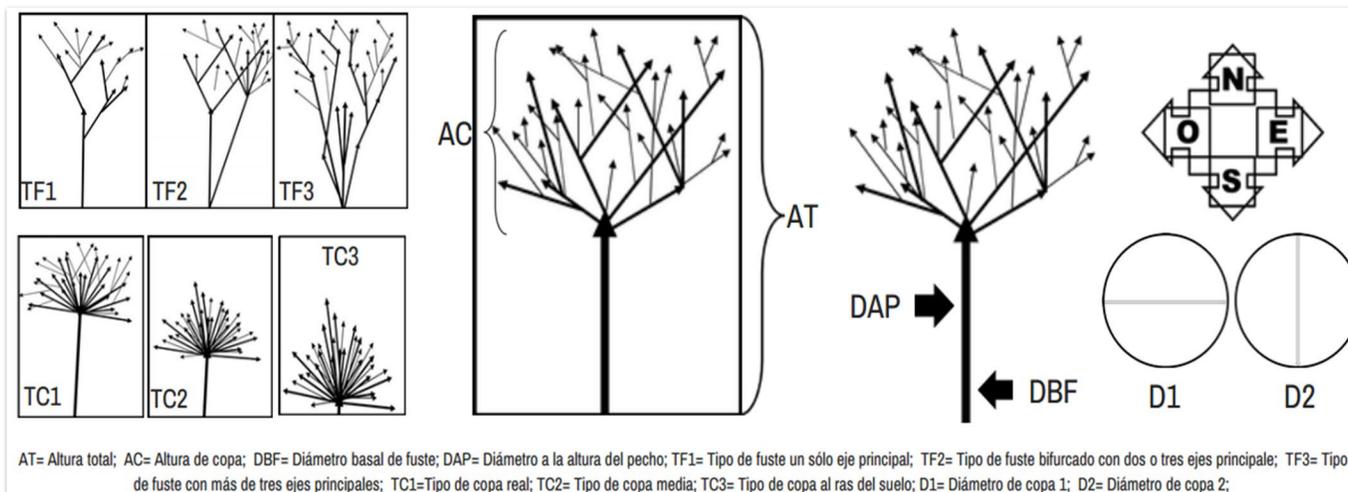


FIGURA 2. Esquemas de variables y atributos evaluados en la vegetación arborea del bosque tropical caducifolio en el municipio de Querétaro, Qro.



## Estimación de índices de importancia y diversidad ecológica

Se estimaron distintos índices de diversidad e importancia ecológica en cada sitio de muestreo, a partir del número de especies y de la cantidad de individuos por especie. Dichos indicadores fueron: índice de Simpson (Peet, 1974; Magurran, 1988; Lande, 1996). Índice de Shannon-Wiener (Shannon y Weaver, 1949) y valor de importancia (Magurran, 1988). Interpretando la representatividad de las especies dentro de cada sitio.

## Análisis estadístico

Para determinar las posibles diferencias significativas entre los atributos de arquitectura de desarrollo, así como en las variables de crecimiento de las especies, se realizó análisis de varianza (ANOVA). Para estimar cómo son estas diferencias en sus atributos, se utilizaron pruebas múltiples de medias de Tukey ( $\alpha = 0.5$ ) y análisis de regresión entre atributos, utilizando el programa estadístico SAS (Versión 9.3).

## RESULTADOS

### Diversidad de especies y atributos de especies

En cuanto a diversidad de especies y densidad de individuos dentro del municipio de Querétaro, los resultados evidenciaron que el BTC está compuesto de 22 especies de arbustos y árboles superiores a 150 cm de altura (Tabla 2), con un índice de diversidad Simpson de 0.77 y un índice de Shannon de 0.87.

Se observó en la composición de la vegetación típica del BTC en el municipio de Querétaro, que las especies con mayor densidad relativa fueron *A. schaffneri*, *B. fagaroides*, *F. phillyreoides*, *K. humboldtiana*, *D. viscosa*, *I. murucoides*, mientras que las especies de menor densidad relativa fueron *R. thurberi* y *E. coralloides* (Fig. 3). Las especies que presentaron un mayor valor de importancia ecológica en el bosque tropical caducifolio dentro del municipio de Querétaro son: *K. humboldtiana*, *F. phillyreoides*, *B. fagaroides*, *I. murucoides* y *A. schaffneri*. Otras especies que destacan por su valor de importancia son *D. viscosa*, *A. farneciana*, *Senna polyantha*, *L.*

*Leucocephala*, *Celtis palida* y *P. laevigata*, especies que están en todos los sitios y presentan elevada abundancia. Por el contrario, las de menor valor de importancia ecológica fueron *R. thurberi* y *E. coralloides*, estas especies solo se encontraron en un sitio y con una abundancia muy baja (Fig. 3).

Se observó que algunas de las especies presentaron un menor grado de importancia ecológica, sin embargo, la densidad relativa de dichas especies es elevada, como sucede con *A. schaffneri*, especie sobresaliente al ser una de las de mayor abundancia. Por otra parte, *D. viscosa* es una especie con alta densidad relativa y con un valor de importancia menor. Caso distinto es el de *B. fagaroides*, *F. phillyreoides*, *K. humboldtiana* y *I. murucoides*, con alta abundancia relativa y un elevado valor de importancia. Por otra parte, existen especies también importantes, pero poco abundantes con presencia en todos los sitios como *S. polystachya*, *C. pallida*, *P. laevigata*, y especies con poca abundancia y poca distribución como *Acacia angustissima*, *Acacia pennatula*, *Lysiloma microphyllum*, *Condalia velutina*, *Albizzia occidentalis*, *Mimosa monancistra*, *R. thurberi*, *E. coralloides* (Fig. 3 y 4).

Se estimaron diferencias significativas entre las especies para los atributos de forma como: altura total, altura de copa, diámetro basal, DAP, tipo de fuste, tipo de copa, biomasa aérea y carbono presente ( $P = 0.001$ , Tabla 3). Se observó que *L. leucocephala* fue la especie que presentó mayor diferenciación con respecto al resto de especies en las variables altura total (546.9 cm) y altura de copa (265 cm), copa más regular en comparación con las demás especies (Tabla 4; Fig. 5). Otras especies con mayor altura fueron: *A. occidentalis*, *S. polyantha*, *P. laevigata*, *E. coralloides*, *C. pallida*, *L. microphyllum*, *S. polyantha*, *Bursera palmeri* e *I. murucoides*, mientras que las especies que presentaron menor altura fueron: *M. monancistra* (233 cm), *A. pennatula* y *A. angustissima*. Por otra parte, *R. thurberi* y *A. pennatula* presentaron una copa más cercana al suelo.

Respecto a diámetro del fuste basal y DAP, la especie que sobresale es: *P. laevigata* diferenciándose del resto de las especies en el grosor de su tallo. Por otra parte, *D. viscosa* es diferente de las demás al ser una especie abundante que presenta menores diámetros en su fuste (Tabla 4).

TABLA 2. Diversidad y densidad de especies representativas del BTC dentro del municipio de Querétaro, Qro.

Especie	No. Ind	Den.	Fre.	V. de I.	No*ha	D. M. (g/cm <sup>3</sup> )	Fuente
<i>Acacia schaffneri</i> (L.) Willd.	146	0.006	0.389	17.6	64.9	0.73	Villalón (1992)
<i>Bursera fagaroides</i> (Kunth) Engl.	141	0.006	0.583	20.8	62.7	0.32	Verduzco (2016)
<i>Forestiera phillyreoides</i> (Benth.) Torr.	140	0.006	0.639	21.8	62.2	0.63	Ordóñez <i>et al.</i> (2015)
<i>Karwinskia humboldtiana</i> (Willd. Ex Roem. & Schult.) Zucc.	140	0.006	0.722	23.3	62.2	0.53	Ordóñez <i>et al.</i> (2015)
<i>Dodonea viscosa</i> (L.) Jacq.	138	0.006	0.194	13.4	61.3	1.04	Ordóñez <i>et al.</i> (2015)
<i>Ipomoea murucoides</i> Roem. Shult.	133	0.006	0.528	19.2	59.1	0.03	Ordóñez <i>et al.</i> (2015)
<i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) De Wit	88	0.004	0.139	8.8	39.1	0.84	Zanne <i>et al.</i> (2009)
<i>Acacia farnesiana</i> (L.) Willd.	82	0.004	0.417	13.5	36.4	0.73	Ordóñez <i>et al.</i> (2012)
<i>Eysenhardtia polystachya</i> (Ortega) Sarg.	56	0.002	0.167	7.1	24.9	0.7	Ordóñez <i>et al.</i> (2015)
<i>Bursera palmeri</i> S. Watson	48	0.002	0.222	7.5	21.3	0.33	Zanne <i>et al.</i> (2009)
<i>Acacia angustissima</i> (Schltdl & Cham.) Benth	46	0.002	0.083	4.8	20.4	0.85	Ordóñez <i>et al.</i> (2015)
<i>Senna polyantha</i> (Moc. & Sessé ex Collad.) Irwin & Barneby.	43	0.002	0.417	10.8	19.1	0.63	Ordóñez <i>et al.</i> (2015)
<i>Acacia pennatula</i> (Schltdl & Cham.) Benth.	38	0.002	0.083	4.2	16.9	0.73	Ordóñez <i>et al.</i> (2012)
<i>Lysiloma microphyllum</i> Benth.	28	0.001	0.111	4.0	12.4	0.88	Ordóñez <i>et al.</i> (2015)
<i>Celtis pallida</i> Torr.	26	0.001	0.333	8.0	11.6	0.66	Ordóñez <i>et al.</i> (2012)
<i>Condalia velutina</i> I. M. Johnst	25	0.001	0.167	4.9	11.1	0.63	(Ordóñez <i>et al.</i> 2015)
Salvia sp (arbustiva) celtis caudata	25	0.001	0.028	2.3	11.1	0.63	(Ordóñez <i>et al.</i> 2015)
<i>Prosopis laevigata</i> (Humb. & Bonpl. Ex Willd.) M.C. Johnst.	24	0.001	0.250	6.3	10.7	0.70	Ordóñez <i>et al.</i> (2015)
<i>Albizzia occidentalis</i> Brandegees.	18	0.001	0.083	2.8	8	0.52	Ordóñez <i>et al.</i> (2015)
<i>Mimosa monancistra</i> Bent.	14	0.001	0.056	2.0	6.2	0.67	Ordóñez <i>et al.</i> (2012)
<i>Randia thurberi</i> S. Watson	7	0.000	0.028	1.0	3.1	0.86	Ordóñez <i>et al.</i> (2015)
<i>Erythrina coralloides</i> DC.	2	0.000	0.056	1.2	0.9	0.38	Zanne <i>et al.</i> (2009)

No. Ind: Número de individuos, Den.: Densidad, Fre.: Frecuencia, V. de I.: Valor de importancia, No\*ha: Número de individuos por hectárea, D.M.: Densidad de la madera

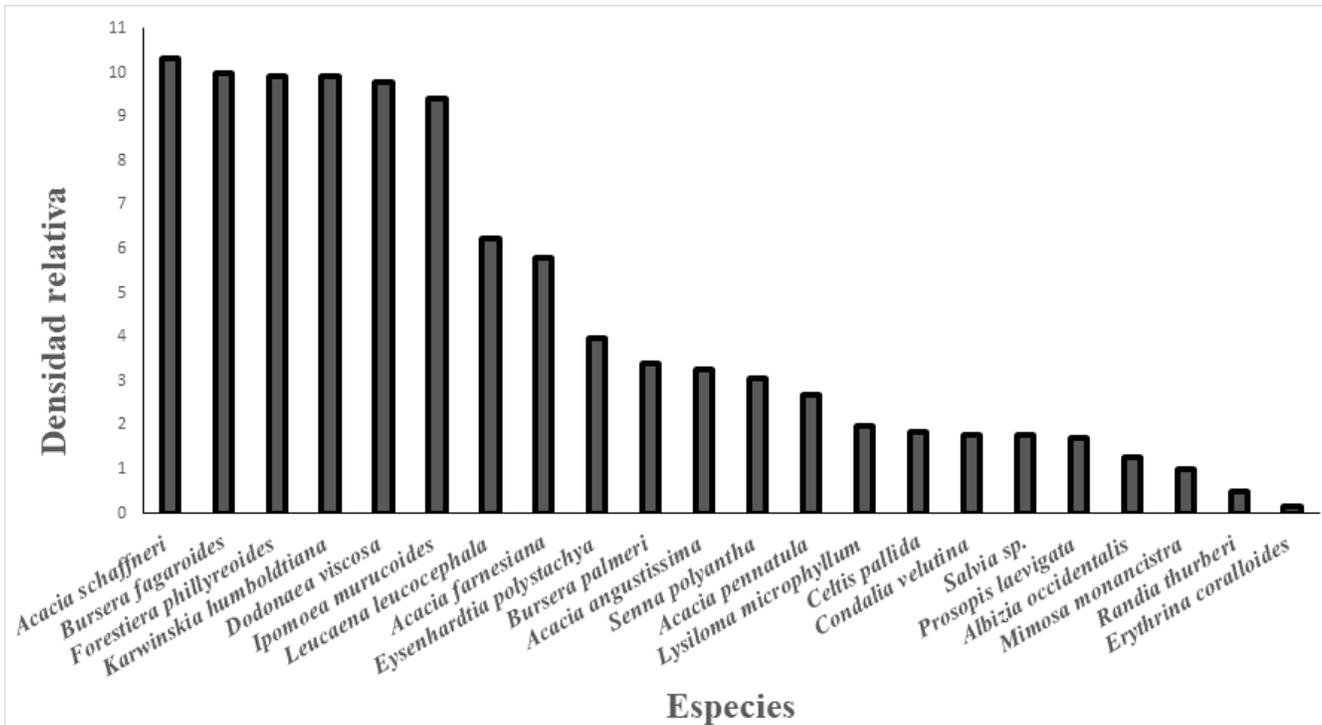


FIGURA 3. Comparación de la densidad relativa de arbustos y árboles nativos encontrados en el municipio de Querétaro, Qro.

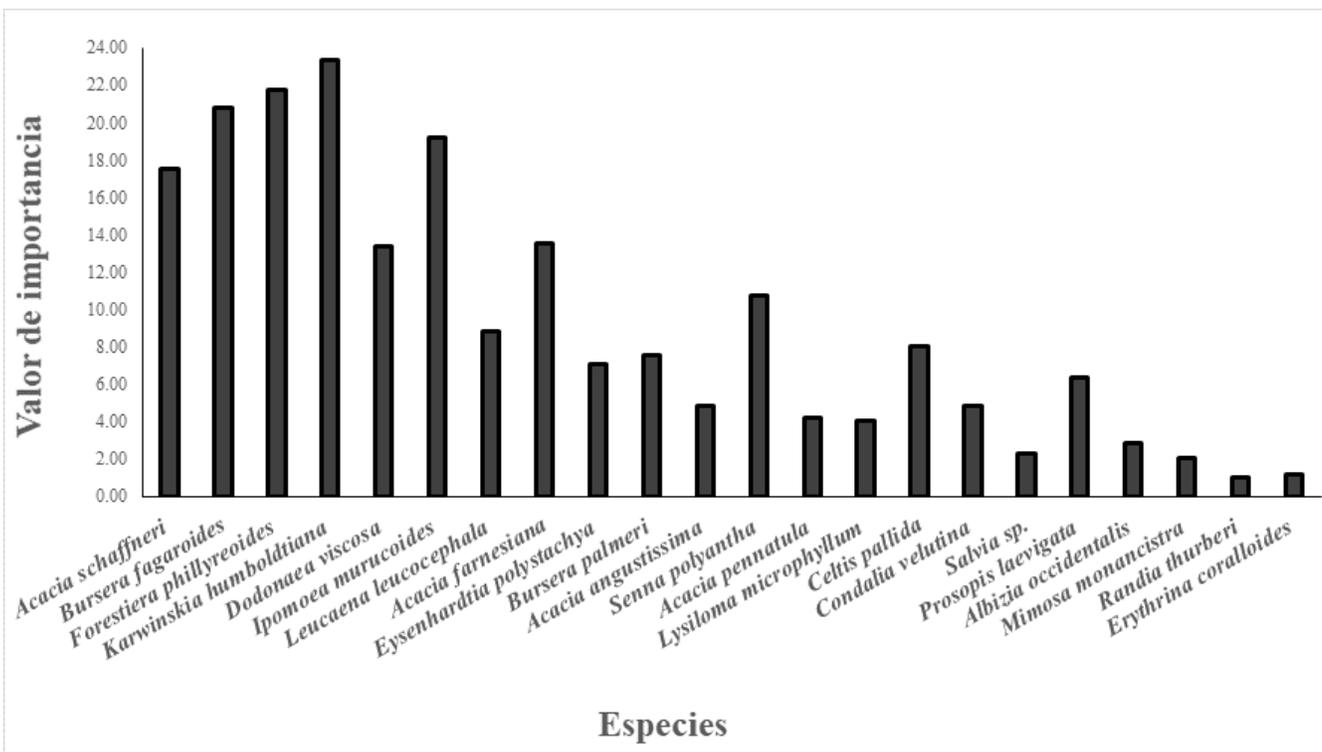


FIGURA 4. Comparación del valor de importancia de arbustos y árboles del bosque tropical caducifolio en el municipio de Querétaro, Qro.

TABLA 3. Análisis de varianza de variables de crecimiento, arquitectura y capacidad de captura de carbono del total de individuos evaluados del BTC del municipio de Querétaro, Qro.

F. V.	g. l.	F	P
Altura	21	42.37	0.0001
Altura de copa	21	21.26	0.0001
Diámetro basal	21	8.64	0.0001
Diámetro altura del pecho	21	9.73	0.0001
Tipo de fuste	21	13.52	0.0001
Tipo de copa	21	15.94	0.0001
Biomasa	21	14.81	0.0001
Carbono	21	14.81	0.0001

g.l.: grados de libertad, F: Valor de distribución de Fisher, P: significancia estadística

### Carbono almacenado

En las ecuaciones para la estimación del carbono almacenado se incluyeron las variables climáticas, así como variables de crecimiento (altura y diámetro) y la densidad de madera (Tabla 1, Tabla 2). Debido a lo anterior, con los resultados obtenidos se presumen relaciones positivas entre los atributos de los árboles y la captura de carbono; los coeficientes de determinación para dichas relaciones entre las variables de crecimiento y captura de carbono fueron: altura-contenido de carbono ( $r^2 = 0.19$ ), diámetro basal-contenido de carbono ( $r^2 = 0.33$ ) y DAP-contenido de carbono ( $r^2 = 0.37$ ). Se observó que *P. laevigata* aunada a *L. leucocephala* presentó la mayor cantidad de carbono almacenado con valores superiores en cobertura de copa y DAP, mientras *B. fagaroides* y *B. palmeri* fueron especies con menor carbono almacenado (Tabla 4, Fig. 6).

### DISCUSIÓN

El bosque tropical caducifolio del municipio de Querétaro se caracteriza por la existencia de una mayor abundancia de especies que dominan la estructura de dichos bosques. Según los resultados del índice de diversidad de Simpson (Shannon y Weaver, 1949), las especies con mayor presencia fueron: *A. schaffneri*, la cual, puede ser producto de su tolerancia a condiciones adversas y su capacidad para remplazar a otras especies (Flores y Yeaton, 2000). Por otro lado, la mayoría de las especies de estudio están presentes en todos los sitios

según el resultado del índice de Shannon. El número de especies presentes en el municipio de Querétaro es similar al encontrado por Zacarías-Eslava, Cornejo-Tenorio, Cortés-Flores, González-Castañeda e Ibarra-Manríquez (2011) en la localidad de Cerro el Águila, en el estado de Michoacán. Estos autores encontraron 23 especies, de las cuales, pocas son iguales a las evaluadas en el presente estudio, como el caso de *I. murucoides*, *F. phillyreoides*, *C. vetulina*; sin embargo, los resultados publicados para la localidad Cerro del Águila difieren de lo estimado en el presente estudio respecto al índice de Simpson, al tener como resultado un valor 0.12 contra 0.77 del municipio de Querétaro. Por otro lado, en un estudio realizado en el estado de Chiapas (Rocha-Loredo, Ramírez-Marcial y González-Espinosa, 2010), se identificaron entre 13 y 18 especies en el BTC las cuales representan un número menor a las encontradas en este estudio (22 especies). Las diferencias en abundancia y riqueza de especies de los BTC en México pueden ser un indicador del estado del bosque, la presencia de un número superior de especies presume una mayor magnitud de contribución a algunos procesos del ecosistema (Balvanera *et al.*, 2006; Cardinale *et al.*, 2011; Quijas, Schmid y Balvanera, 2010), lo que ofrece servicios ambientales asociados a la regulación climática y al almacenamiento de carbono (Ledesma-Colunga, Cambrón-Sandoval, Suzán-Azpiri, Guevara-Escoba y Luna-Soria, 2015; Potvin y Gotelli, 2008; Ruiz-Jaen y Potvin, 2010). Con base en lo anterior y en los resultados de abundancia y riqueza de especies, el BTC del municipio de Querétaro se puede considerar en buen estado de conservación.

La composición de la vegetación típica del bosque tropical caducifolio del municipio de Querétaro es muy similar a la encontrada en el cerro El Águila en Michoacán, en este último sitio, *I. murucoides* y *F. phillyreoides* presentan los valores más elevados de importancia ecológica en comparación con el resto de las especies (Zacarías-Eslava *et al.*, 2011). En el presente estudio, se observó un comportamineto similar, ya que algunas especies presetaron elevados valores de importancia ecológica como: *A. schaffneri*, *B. fagaroides*, *F. phillyreoides*, *K. humboldtiana*, *D. viscosa* e *I. murucoides*, en relación al resto de las especies evaluadas (16 especies restantes).



TABLA 4. Análisis múltiple de medias de Tukey ( $\alpha = 0.05$ ) de variables de crecimiento, arquitectura y capacidad de captura de carbono del total de individuos evaluados del BTC del municipio de Querétaro, Qro.

Especie	Altura (cm)		Altura de copa (cm)		Diámetro basal (cm)		DAP (cm)		Tipo de fuste		Tipo de copa		Cantidad de carbono (kg / árbol)	
	Media	Tukey	Media	Tukey	Media	Tukey	Media	Tukey	Media	Tukey	Media	Tukey	Media	Tukey
<i>A. schaffneri</i>	247.1	HIJ	114.0	BCDE	19.3	ABC	25.7	ABC	2.0	ABCD	1.5	BCDE	5.2	ABCDE
<i>B. fagaroides</i>	299.0	DEFGHIJ	133.1	BCDE	19.8	ABC	21.0	BCD	1.7	CD	1.5	BCDE	3.1	DE
<i>F. phillyreoides</i>	314.7	CDEFGHIJ	134.7	BCDE	22.5	ABC	24.5	ABCD	2.4	ABC	2.0	ABC	5.4	ABC
<i>K. humboldtiana</i>	244.8	HIJ	117.4	BCDE	17.0	ABC	15.9	BCD	2.5	AB	2.1	ABC	4.0	BCDE
<i>D. viscosa</i>	254.1	GHIJ	109.0	CDE	8.8	C	8.3	D	2.1	ABCD	1.9	ABCD	4.0	BCDE
<i>I. muruoides</i>	345.4	BCDEFGHI	140.1	BCDE	26.3	AB	24.1	ABCD	1.9	ABCD	1.7	BCDE	3.7	CDE
<i>L. leucocephala</i>	546.9	A	265.0	A	20.9	ABC	20.6	BCD	2.0	ABCD	1.1	E	6.0	AB
<i>A. farnesiana</i>	262.9	FGHIJ	108.4	CDE	18.3	ABC	19.5	BCD	2.5	AB	1.9	ABCD	5.2	ABCDE
<i>E. polystachya</i>	287.3	DEFGHIJ	117.4	BCDE	14.7	BC	13.9	CD	2.1	ABCD	1.6	BCDE	4.5	ABCDE
<i>B. palmeri</i>	349.1	BCDEFGHI	139.0	BCDE	17.8	ABC	17.7	AB	1.4	D	1.2	DE	3.0	E
<i>A. angustissima</i>	238.0	HIJ	106.1	CDE	12.9	BC	18.9	BCD	2.1	ABCD	1.5	BCDE	4.7	ABCDE
<i>S. polyantha</i>	364.9	BCDEF	172.6	BCD	20.9	ABC	17.3	BCD	1.9	ABCD	1.4	CDE	5.0	ABCDE
<i>A. pennatula</i>	235.6	IJ	81.3	E	13.9	BC	13.9	CD	2.3	ABC	2.0	ABC	4.2	ABCDE
<i>L. microphyllum</i>	373.8	BCDE	186.0	ABC	17.4	ABC	18.7	AB	1.8	BCD	1.2	E	5.3	ABC
<i>C. pallida</i>	346.6	BCDEFGH	133.8	BCDE	19.3	ABC	19.3	BCD	2.3	ABC	1.9	ABC	5.0	ABCD
<i>C. velutina</i>	263.8	EFGHIJ	94.4	BCD	20.1	ABC	23.5	ABCD	1.8	BCD	1.8	BCDE	5.3	ABCD
<i>Salvia sp</i>	435.6	B	191.6	AB	23.4	ABC	22.5	ABCD	2.7	A	2.0	ABC	5.3	ABC
<i>P. laevigata</i>	358.7	BCDEFG	133.4	BCDE	30.7	A	38.6	A	2.1	ABCD	1.8	BCDE	6.4	A
<i>A. occidentalis</i>	420.6	BC	186.7	ABC	20.9	ABC	16.8	BCD	1.5	D	1.4	CDE	4.1	BCDE
<i>M. monancistra</i>	233.6	J	101.8	DE	18.1	ABC	17.8	AB	2.5	AB	2.2	AB	4.3	ABCDE
<i>R. thurberi</i>	317.5	CDEFGHIJ	87.5	E	15.8	BC	15.4	CD	2.5	A	2.5	A	5.3	ABCD
<i>E. coralloides</i>	395.0	BCD	144	BCDE	22.5	ABC	31.0	AB	1.5	D	1.5	BCDE	4.2	BCDE

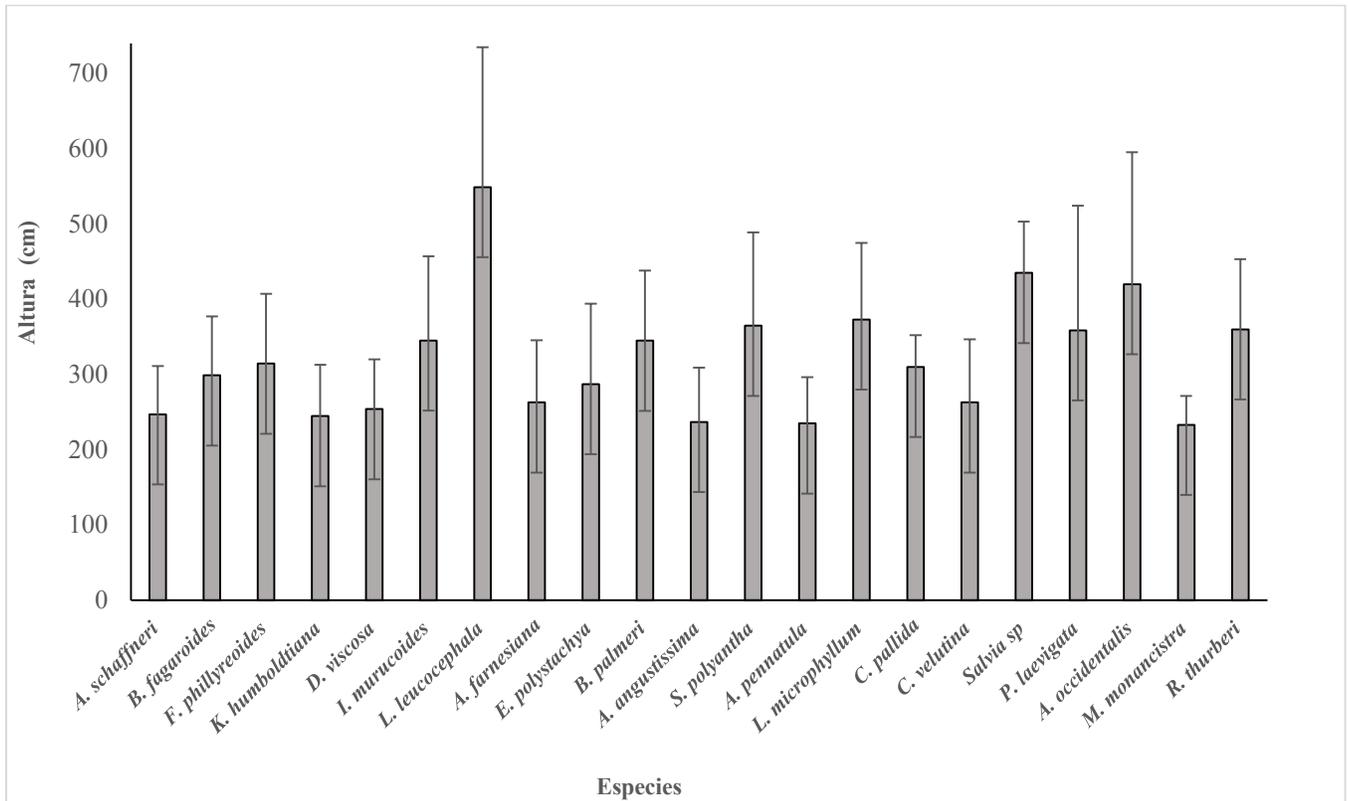


FIGURA 5. Altura promedio del total de individuos evaluados en el BTC del Municipio de Querétaro, Qro.

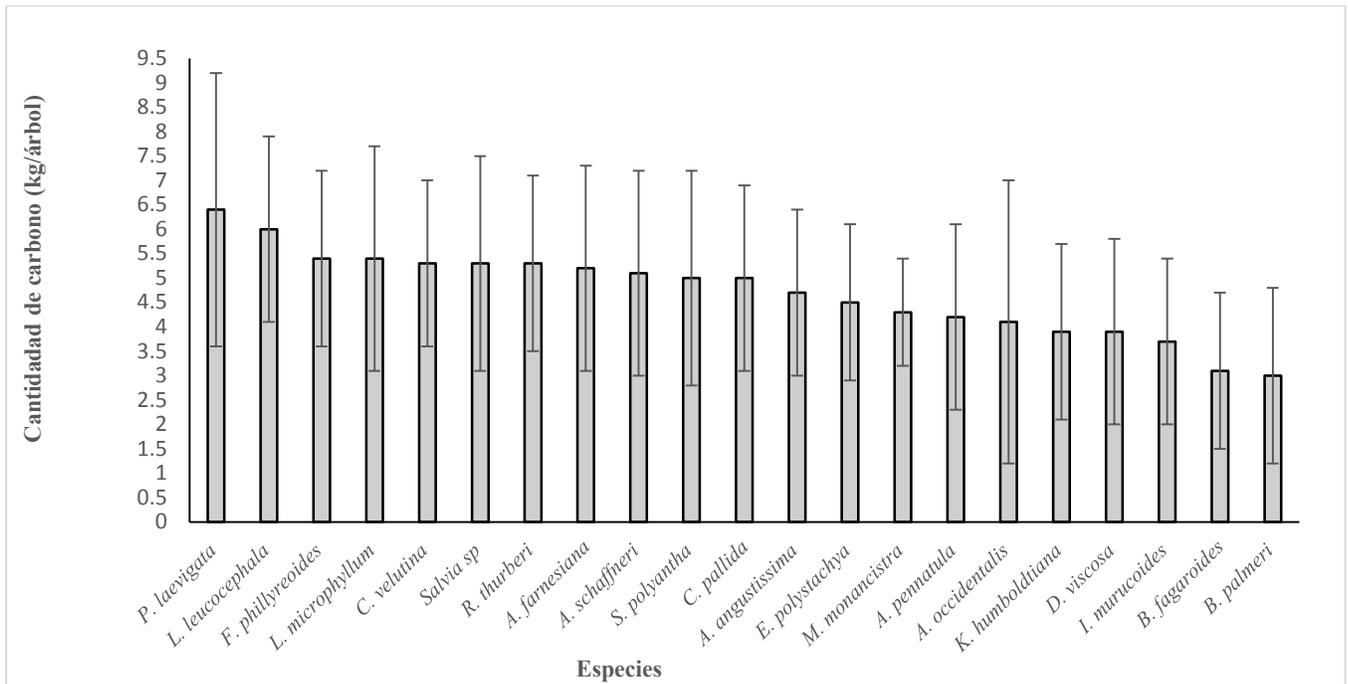


FIGURA 6. Cantidad de carbono promedio del total de individuos evaluados en el BTC del Municipio de Querétaro, Qro.



Si bien, históricamente la selección de mejores especies e individuos se basa en caracteres productivos y de crecimiento, dentro de la vegetación del bosque tropical caducifolio las especies presentan algunos atributos y usos diferentes a los productivos como lo son: medicinal, artesanal, forraje, ceremonial, etc. (Malda, Jiménez y Martínez, 2009; Sánchez *et al.*, 2011), por lo cual conservar y aumentar la diversidad del bosque tropical caducifolio es primordial. Como ejemplo de lo anterior, se puede mencionar a *E. coralloides*, que es una especie que presenta poca abundancia, pero que debe ser prioritaria en planes de reforestación o conservación, ya que se considera una especie multipropósito al tener gran importancia ecológica y dentro de la medicina tradicional por la producción de alcaloides en sus tejidos (García-Mateos, Soto-Hernández y Kelly, 1998; García-Mateos, Soto-Hernández, Martínez-Vázquez y Villegas-Montero, 1999; Soto-Hernández y Miguel-Chavez, 2006). Por otra parte, la presencia de especies como *A. pennatula*, *A. farnesiana*, *Eysenhardtia polystachya* y *I. murucoides*, son conocidas como “especies típicas” de un estadio de sucesión estable del bosque tropical caducifolio (Labat, 1995; Rzedowski, 1978), da una idea del estado de conservación del bosque. Otro ejemplo es *Leucaena leucocephala*, especie con mayor altura, amplias copas y una mayor capacidad de almacenar carbono, entre otros atributos; sumado a lo anterior, se recomienda que estos árboles sean usados en sistemas silvo-pastoriles (Fiares, Olivera, Azevedo, Moura y Andrade, 2016) y en programas de restauración ecológica, por presentar rápido crecimiento, ayudar al establecimiento de otras especies y tener el potencial de aumentar la materia orgánica en suelos (Cecon, Sánchez y Powers, 2015; Stewart y Dunsdon, 1994). Otra de las especies identificadas fue *D. viscosa*, que se caracterizó por ser muy abundante en los sitios de monitoreo del presente estudio; por sus atributos de arquitectura, velocidad de elongación y resistencia a la sequía, se recomienda su uso en reforestación (Asbjornsen, Vogt y Ashton, 2004).

## Carbono almacenado

En la estimación del carbono almacenado, además de la densidad de la madera, se incluyeron las variables climáticas, que permitieron tener mayor precisión en la ecuación diámetro-altura del árbol; la densidad de la madera se presenta como una variable linealmente dependiente del estrés bioclimático (Chave *et al.*, 2005; 2014). Se observó que *P. laevigata* presentó la mayor cantidad de carbono almacenado, con mayores copas y mayores diámetros a la altura del pecho. Complementariamente, se estimó que *P. laevigata* está asociado a una mayor diversidad de especies, lo cual hace posible que sea promotor del aumento en la cantidad de carbono (Yerena-Yamallel *et al.*, 2015).

*Acacia schaffneri* presenta buena capacidad de almacenamiento de carbono en comparación con otras especies. Este resultado concuerda con lo observado por Yerena-Yamallel, Jiménez-Pérez, Aguirre-Calderón y Treviño-Garza (2011), en el matorral Tamaulipeco, estos autores encontraron que *A. Schaffneri* almacena más carbono con respecto a seis especies propias de la vegetación. Por otro lado, aunque *A. farnesiana* tiene poca presencia en el ecosistema, su carbono almacenado es elevado en comparación con el de otras especies típicas del bosque tropical caducifolio encontradas en este estudio. El uso de esta especie se ha recomendado en métodos de manejo de fitoremediación de suelos, en virtud de que los tallos pueden acumular metales pesados, por ello, es muy recomendable reforestar con estos árboles (Landeros-Márquez *et al.*, 2017; Yerena-Yamallel *et al.*, 2011). Adicionalmente, se ha propuesto para el control de la erosión en las zonas semiáridas (Vásquez-Méndez *et al.*, 2010).

Las especies del bosque tropical caducifolio *A. schaffneri*, *B. fagaroides*, *E. polystachya* y *K. humboldtiana* han sido recomendadas en proyectos de reforestación ecológica a mediano y largo plazo; algunos autores han pronosticado en el futuro un incremento en sus áreas de distribución en el centro de México en un contexto de cambio climático

(Gelviz-Gelvez, Pavon, Illoldi-Rangel y Ballesteros-Barrea, 2015). *Leucaena leucocephala* es otra especie que presenta buenos atributos para ser utilizada en programas de restauración ecológica y reforestación, al ser una especie medianamente abundante y con un valor de importancia ecológica intermedio, alcanza mayor altura, mayor carbono almacenado y ha sido recomendada y usada en sistemas silvopastoriles (Fiares *et al.*, 2016).

Otra especie importante que presentó poca densidad (0.083) y bajo almacenamiento de carbono (4.2 kg/árbol) es *A. pennatula*; Sin embargo, en otros estudios se ha observado su sobresaliente producción de biomasa dentro de 27 especies de la zona seca de América central (Stewart y Dundson, 1994). De la misma forma, *Mimosa monanistrata* presentó baja densidad (0.01) y fijación de carbono (4.1 kg/árbol), contrario a otros estudios; esta especie ha sido recomendada por presentar una elevada capacidad de eliminar el pireno (BaP) de suelos contaminados (Álvarez-Bernal Contreras-Ramos, Marsch y Dendooven, 2007). *Dodonaea viscosa* puede ser una especie importante utilizándola como pionera en programas de reforestación, debido a que es típica de sucesión temprana porque se caracteriza por un rápido crecimiento además llega a producir hojas aún bajo condiciones de sequía (Asbjornsen *et al.*, 2004).

Otras especies recomendadas para su uso en programas de reforestación son aquellas con poca presencia como *R. thurberi* y *E. coralloides*; de esta última solo se encontraron dos individuos durante el periodo de muestreo; sin embargo, dicha especie produce alcaloides en sus tejidos, con aplicabilidad en medicina tradicional (García-Mateos *et al.*, 1998, 1999; Soto-Hernández y Miguel-Chavez, 2006).

Se observaron 22 especies de arbustos y árboles dentro las que destacan por su abundancia: *A. Schaffneri*, *B. fagaroides*, *F. phillyreoides*, *K. humboldtiana*, *D. viscosa* e *I. murucooides*; con mayor grado de importancia: *K. humboldtiana*, *F. phillyreoides*, *B. fagaroides*, *I. murucooides* y *A. schaffneri*. Por otra parte, con mayor altura y capacidad de fijación de carbono se registraron especies como *P. laevigata* y *L. leucocephala* y las menos abundantes *R. thurberi* y *E. coralloides*.

## CONCLUSIONES

Se estimaron diferencias significativas ( $P \geq 0.05$ ) entre especies del BTC del municipio de Querétaro, para el total de variables evaluadas.

Se observaron 22 especies de arbustos y árboles, siendo las más abundantes: *Acacia schaffneri*, *Bursera fagaroides*, *Forestiera phillyreoides*, *Karwinskia humboldtiana*, *Dodonaea viscosa* e *Ipomea murucooides*.

Se estimó que especies como *Prosopis laevigata* y *Leucaena leucocephala*, presentan la mayor capacidad de captura de carbono en el presente estudio.

## RECONOCIMIENTOS

Se agradece a los alumnos: Josué Galicia Pérez, Eliza Nateras Morales, Yanet Ángeles Gardini y Natalia Fourrey Arias, por su participación en la realización de las evaluaciones y colecta de material.

## REFERENCIAS

- Álvarez-Bernal, D., Contreras-Ramos, S., Marsch, R., & Dendooven, L. (2007). Influence of catclaw *Mimosa monanistrata* on the dissipation of soil PAHs. *International Journal of Phytoremediation*, 9, 79-90. doi: 10.1080/15226510701232690
- Asbjornsen, H., Vogt K., & Ashton, M. (2004). Synergistic responses of oak, pine and shrub seedling to edge environments and drought in a fragmented tropical highland oak forest, Oaxaca, México. *Forest Ecology and Management*, 192, 313-334.
- Avendaño, H., D. M., Acosta M., M., Carrillo A., F., & Etchevers B., J. D. (2009). Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 32(3), 233-238.
- Ávila, G., Jiménez, F., Beer, J., Gómez, M., & Ibrahim, M. (2001). Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. *Revista Agroforestería de las Américas*, 3(8), 32-35.
- Balvanera, P., Pfisterer, A., Buchmann, N., He, J. Nakashizuka, T., Raffaelli, D., & Schmid, B. (2006). Quantifying the evidence for biodiversity effects on ecosystem functioning and services. *Ecology Letters*, 9(10), 1146-1156. doi: 10.1111/j.1461-0248.2006.00963



- Bauer, I., Apps, M., Bhatti, J., & Lal, R. (2006). Climate change and terrestrial ecosystem management: Knowledge gaps and research needs. En J. Bhatti, R. Lal, M. Apps, & M. A. Price (Eds.) *Climate change and managed ecosystems* (pp. 411-426). EE. UU.: CRC Press.
- Becerril-Piña, R., Gonzáles-Sosa, E., & Hernández-Sandoval, L. (2007). *El semiárido mexicano como sumidero de carbono. Estudio de caso Microciencia "El Carmen"*. Memorias del Congreso Nacional y Reunión Mesoamericana de Manejo de Cuencas Hidrográficas. México, D.F. Instituto Nacional de Ecología.
- Cardinale, B., Matulich, K., Hooper, D., Byrnes, J., Duffy, E., Gamfeldt, L., Balvanera, P., O'Connor, M., & González, A. (2011). The functional role of producer diversity in ecosystems. *American Journal of Botany*, 98(3), 572-592. doi:10.3732/ajb.1000364
- Ceccon, E., Sánchez, I., & Powers, J. (2015). Biological potential of four indigenous tree species from seasonally dry tropical forest for soil restoration. *Agroforestry Systems*, 89(3), 455-467. doi: 10.1007/s10457-014-9782-6
- Chave, J., Condit, R., Aguilar, S., Hernandez, A., Lao, S., & Perez, R. (2004). Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B*, 359, 409-420. doi:10.1098/rstb.2003.1425.
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M., Chamber, J., Eamus, D., Fölster, H., Fromard, F., Higuchi, H., Kira, T., Lescure, J., Nelson, B., Ogawa, H., Puig H., Riéra, B., & Yamakura, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145(1), 87-99. doi: 10.1007/s00442-005-0100-x
- Chave, J., Coomes, D. A., Jansen, S., Lewis, S. L., Swenson, N. G., & Zanne, A. E. (2009). Towards a worldwide wood economics spectrum. *Ecology Letters*, 12(4), 351-366. doi: 10.1111/j.1461-0248.2009.01285.x
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M., & Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20(10), 3177-3190. doi: 10.1111/gcb.12629
- Chomitz, K., Buys, P., De Luca, G., Thomas, T., & Wertz-Kanounnikoff, S. (2007). *At loggerheads?: agricultural expansion, poverty reduction, and environment in the tropical forests*. World Bank policy research report. The World Bank Publications.
- Crookston, N., L. (2010). *Research on forest climate change: potential effects of global warming on forests and Plant Climate Relationships* *plant climate relationships in Western North America and Mexico*. Recuperado de <http://forest.moscowfsl.wsu.edu/climate>
- Crookston, N., L. (2014). *Climate-FVS Versión 2: Content, users guide, applications, and behavior* (Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-319). Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- Cuevas, G., Núñez, N., Guzmán, L., & Santana, F. (1998). El bosque tropical caducifolio en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, Jalisco-Colima, México. *Boletín del Instituto Botánica*, 5, 445-491.
- Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Farahani, E., Kadner, S., Seyboth, K., Adler, A., Baum, I., Brunner, S., Eickemeier, P., Kriemann, B., Savolainen, J., Schlömer, S., Von Stechow, C., Zwickel, T., & Minx, J. (Eds.) (2014). *Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Reino Unido y Nueva York, EUA: Cambridge University Press.
- Esquivel, E. (2013). *Mecanismos nacionales e internacionales de pago por servicios ambientales (PSA) existentes*. Recuperado de <http://www.monitoreoforestal.gob.mx/repositorioidigital/files/original/dd542543089a388798fe0cbcd3692c9.pdf>
- Fiares, W., Olivera, M., Azevedo, A., Moura, R., & Andrade, R. (2016). Energy supplementation in goats under a silvopastoral system of tropical grasses y leucaena. *Revista Ciencia Agronómica*, 48(1), 199-207. doi: 10.5935/1806-6690.20170023
- Flores, F., & Yeaton, H. (2000). The role of competition in plant community organization the Mexican highlands. *Intervención*, 25(8), 365-371.
- Flores, M., Jiménez, J., Madrigal, X., Moncayo, F., & Takaki, F. (1971). *Memorias del mapa de tipo de vegetación de la República Mexicana*. México, D. F.: Secretaria de Recursos Hidráulicos.
- García-Mateos, R., Soto-Hernández, M., Martínez-Vázquez, M., & Villegas-Monter, A. (1999). Isolation of alkaloids of *Erythrina* from tissue culture. *Phytochemical Analysis*, 10, 12-16. doi: 10.1002/(SICI)1099-1565(199901/02)10:1<12::AID-PCA425>3.0.CO;2-A
- García-Mateos, R., Soto-Hernández, M., & Kelly, D. (1998). Alkaloids from six *Erythrina* species endemic to Mexico. *Biochemical Systematics and Ecology*, 26(5), 545-551. doi: 10.1016/S0305-1978(97)00113-0

- Gasparri, I., & Manghi, E. (2004). *Estimación de volumen, biomasa y contenido de carbono de las regiones forestales argentinas*. Argentina: Dirección de Bosques, Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. Unidad de Manejo del Sistema de Evaluación Forestal.
- Gelviz-Gelvez, S., Pavon, N., Illoldi-Rangel, P., & Ballesteros-Barrea, C. (2015). Ecological niche modeling under climate change to select shrubs for ecological restoration on Central México. *Ecological Engineering*, 74, 302-309. doi: 10.1016/j.ecoleng.2014.09.082
- Gracia, C., Vayreda, J., Sabaté, S., & Ibáñez, J. (2004). *Main components of the aboveground biomass expansion factor*. CREA, Universidad of Barcelona, España.
- Hernández-Vargas, G., Sánchez-Velásquez, L., Carmona-Valdovinos, T., Pineda-López, R., & Cuevas-Guzmán, R. (2000). Efecto de la ganadería extensiva sobre los bosques subtropicales de montaña de la Sierra de Manantlán, México. *Madera y Bosques*, 6(2), 13-28. doi: 10.21829/myb.2000.621332
- Houghton, R. (2003). Why are estimates of the terrestrial carbon balance so different?. *Global Change Biology*, 9(4), 500-509. doi: 10.1046/j.1365-2486.2003.00620.x
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi] (2014). Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación escala 1:250 000, serie V. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx>
- Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal [Inafed] (2010). *Municipio de Querétaro, Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México*. Recuperado de <http://siglo.inafed.gob.mx/enciclopedia/EMM22queretaro/index.html>
- Labat, J. N. (1995). Végétation du nord-ouest du Michoacán Mexique. *Flora del Bajío y de Regiones Adyacentes*, fascículo complementario VIII.
- Lande, R. (1996). Statistics and partitioning of species diversity, and similarity among multiple communities. *Blackwell Publishing on behalf of Nordic Society Oikos*, 76, 5-13. doi: 10.2307/3545743
- Landeros-Márquez, O., Trejo-Calzada, R., Reveles-Hernández, M., Valdez-Cepeda, R., Arreola-Ávila, J., Pedroza-Sandoval, A., & Ruíz-Torres, J. (2017). Uso potencial del huizache (*Acacia farnesiana* L. Will) en la fitoremediación de los suelos contaminados con plomo. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17, 11-20. doi: 10.5154/r.rchscfa.2010.08.059.
- Ledesma-Colunga, M., Cambrón-Sandoval, V., Suzán-Azpiri, H., Guevara-Escoba, A., & Luna-Soria, H. (2015). The role of urban vegetation in temperature and heat island effects in Querétaro city, México. *Atmósfera*, 28(3), 205-218. doi: 10.20937/ATM.2015.28.03.05
- Magurran, A. E. (1988). *Ecological Diversity and Its Measurement*. Londres: Croom Helm Ltd.
- Malda B., G., Jiménez C., P. R., & Martínez D. S., M. (2009) *Plantas del parque nacional El Cimatario aptas para la reforestación y diseño de áreas verdes*. México: UAQ.
- Martínez D. S., M., Hernández-Sandoval, L., Pantoja, Y., Gómez, M., Bárcenas, R., & Cabrera, A. (2015). *Plantas nativas y naturalizadas en Querétaro*. Querétaro, Qro.: Universidad Autónoma de Querétaro.
- Miranda, F. (1952). *La vegetación de Chiapas* (2 vols). Tuxtla Gutiérrez: Ediciones del Gobierno del Estado de Chiapas.
- Miranda, F., & Hernández, E. (1963). Los tipos de vegetación de México y su clasificación. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 28, 189-199.
- Ordóñez D., J. A. B., Galicia N., A., Venegas M., N. J., Hernández T., T., Ordóñez D., M. J., & Dávalos-Sotelo, R. (2015). Densidad de las maderas mexicanas por tipo de vegetación con base en la clasificación de J. Rzedowski: compilación. *Madera y Bosques*, 21(Núm. esp.), 77-126. doi: 10.21829/myb.2015.210428
- Ordóñez, J., Munguía-Bárcenas A., Velarde-Meza E. E., Navarrete-Camacho N., & Escandón-Calderón J. A. (2012). *Inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero 1990-2009*. Semarnat. Recuperado de <https://datos.gob.mx/busca/dataset/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero-inegycei>
- Ordóñez, J., & Masera, O. (2001). Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques*, 7(1), 3-12. doi: 10.21829/myb.2001.711314.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2004). *Inventario Forestal Nacional-Manual de Campo Modelo*. Guatemala: Departamento de Montes.
- Peet, R. (1974). The measurement of species diversity. *Annual Review of Ecological and Systematics*, 5, 285-307. doi: 10.1146/annurev.es.05.110174.001441
- Pennington, T., & Sarukhán, J. (2005). *Árboles tropicales de México: manual para la identificación de las principales especies*. México D. F.: UNAM.



- Potvin, C., & Gotelli, N. (2008). Biodiversity enhances individual performance but does not affect survivorship in tropical trees. *Ecology Letters*, 11(3), 217-223. doi: 10.1111/j.1461-0248.2007.01148.x
- Quijas, S., Schmid, B., & Balvanera, P. (2010). Plant diversity enhances provision of ecosystem services: a new synthesis. *Basic and Applied Ecology*, 11, 582-593. doi: 10.1016/j.baae.2010.06.009.
- Rocha-Loredo, A., Ramírez-Marcial, N., & González-Espinosa, M. (2010). Riqueza y diversidad de árboles del bosque tropical caducifolio en la Depresión Central de Chiapas. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 87, 89-103.
- Ruiz-Jaen, M., & Potvin, C. (2010). Tree diversity explains variation in ecosystem function in a neotropical forest in Panama. *Biotropica*, 42(6), 638-646. doi: 10.1111/j.1744-7429.2010.00631.x
- Rzedowski, J. (1978). *Vegetación de México*. México, D. F.: Limusa.
- Rzedowski, J. (1991). El endemismo en la flora fanerogámica mexicana: una apreciación analítica preliminar. *Acta Botánica Mexicana*, 15, 47-64.
- Rzedowski, J. (1996). Vegetación del estado de San Luis Potosí. *Acta Científica Potosina*, 5, 5-291.
- Rzedowski, J., & Calderón, G. (1987). El bosque tropical caducifolio de la región mexicana del Bajío. *Trace*, 12, 12-21.
- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G., Crookston, N., Duval, P., St-Amant, R., Beaulieu, J., & Richardson, B. (2010). Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for Mexico and their use in understanding climate-change impacts on the vegetation. *Climatic Change*, 102, 595-623. doi: 10.1007/s10584-009-9753-5
- Sánchez-Velásquez, L., Hernández-Vargas, G., Carranza-M., M., Pineda-López, M., Cuevas-G., R., & Aragón-C., F. (2002). Estructura arbórea del bosque tropical caducifolio usado para la ganadería extensiva en el norte de la Sierra de Manantlán México. *Antagonismos de usos. Polibotánica*, 13, 25-46.
- Sánchez, M., Hernández, O., Hernández, M., Maruri, A., Torres, G., & Chávez, M. (2011). *Técnicas para propagación de especies nativas calve para la forestación, la reforestación y restauración del municipio de Querétaro y su área de influencia*. CONCYTEQ. Querétaro, México. 72 p.
- SAS Institute Inc [SAS] (2004). SAS / STAT 9.3 User's Guide. SAS Institute Inc. Cary, North Carolina, USA.
- Shannon, C., & Weaver, W. (1949). *The mathematical theory of communication*. Urbana, IL, EEUU: University of Illinois Press.
- Soto-Hernández, M., & Miguel-Chávez, R. (2006). Anti-fungal activity of alkaloid extract of *Erythrina coralloides* A. DC. Against five phytopathogen fungi. *Planta Medica*, 72(11), 1002-1002.
- Stewart, J., & Dunsdon, A. (1994). Performance of 25 Central America dry zone hardwoods in a tropical series of species elimination trials. *Forest Ecology and Management*, 65(2-3), 183-193. doi: 10.1016/0378-1127(94)90169-4
- Stork, N., & Samways, M. (1995). Inventorying and monitoring. En V. H. Heywood (ed.). *Global biodiversity assessment* (pp. 453-543). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Sullivan, B., Ducey, J., Orwig, A., Cook, B., & Palace, W. (2017). Comparison of lidar- and allometry-derived canopy height models in an eastern deciduous forest. *Forest Ecology and Management*, 06, 83-94. doi: 10.1016/j.foreco.2017.10.005.
- Trejo, I., & Dirzo, R. (2000). Deforestation of seasonally dry tropical forest: a national and local analysis in México. *Biological Conservation*, 94(2), 133-142. doi: 10.1016/S0006-3207(99)00188-3
- Vásquez-Méndez, R., Ventura-Ramos, E., Oleschko, K., Hernández-Sandoval, L., Jean-Francis P., & Nearing, M. (2010). Soil erosion and runoff in different vegetation patches from semiarid Central Mexico. *Catena*, 80, 162-169. doi: 10.1016/j.catena.2009.11.003
- Verduzco S., O. E. (2016). Crecimiento basal de especies arbóreas de la Península de Yucatán de acuerdo a un gradiente en la disposición de agua. Tesis de maestría, El Colegio de la Frontera Sur, Chetumal, Q. Roo., México. Recuperado de [http://aleph.ecosur.mx:8991/exlibris/aleph/a22\\_1/apache\\_media/RCCGGYL8TQ98K9F8MYXVH2JX83KMR L.pdf](http://aleph.ecosur.mx:8991/exlibris/aleph/a22_1/apache_media/RCCGGYL8TQ98K9F8MYXVH2JX83KMR L.pdf)
- Villalón, M. H. (1992). *Peso específico básico aparente y humedad de la madera de 26 especies de matorral del noreste de México*. Reporte científico, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Yerena-Yamalle, J., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O., & Treviño-Garza, E. (2011). Concentración de carbono en la biomasa aérea del Matorral Espinoso Tamaulipeco. *Revista Chapingo Serie Ciencia Forestales y del Ambiente*, 17(2), 283-291.
- Yerena-Yamalle, J., Jiménez-Pérez, J., Alanís-Rodríguez, E., Pompa-García, M., Aguirre-Calderón, O., & Treviño-Garza, E. (2015). Contenido de carbono en la biomasa

aérea del Mesquital con historia agrícola, en México. *Interciencia*, 40(10), 722-726.

Zacarias-Eslava, L., Cornejo-Tenorio, G., Cortés-Flores, J., González-Castañeda, N., & Ibarra-Manríquez, G. (2011). Composición estructura y diversidad del cerro El Águila, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 82, 854-859.

Zanne, A., Lopez-Gonzalez, G., Coomes D., Ilic, J., Jansen, S., Lewis, S., Miller, R., Swenson, N., Wiemann, M., & Chave, J. (2009). Global wood density database. doi: 10.5061/dryad.234

Zhao, K., Popescu, S., & Nelson, R. (2009). Lidar remote sensing of forest biomass: A scaleinvariant estimation approach using airborne lasers. *Remote Sensing Environment*, 113(1), 182-196. doi: 10.1016/j.rse.2008.09.009

Manuscrito recibido el 11 de enero de 2018

Aceptado el 6 de julio de 2018

Publicado el 3 de mayo de 2019

Este documento se debe citar como:

Soto-Correa, J. C., Cambrón-Sandoval, V. H., & Renaud-Rangel, R. (2019). Atributos de las especies arbóreas y su carbono almacenado en la vegetación del municipio de Querétaro. *Madera y Bosques*, 25(1), e2511699. doi: 10.21829/myb.2019.2511699



Madera y Bosques por Instituto de Ecología, A.C. se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.