

Estructura arbórea en bosques primarios de *Picea martinezii* T.F. Patterson

Arboreal structure in primary forests of *Picea martinezii* T.F. Patterson

José Israel López Martínez¹, Eduardo Javier Treviño Garza^{2*}, Oscar Alberto Aguirre Calderón²,
José Manuel Mata Balderas³

¹ Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Roque (TecNM-IT Roque), México.

² Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León. C.P. 67700, Linares, Nuevo León, México.

*ejtrevin@gmail.com

³ Gestión Estratégica y Manejo Ambiental S.C. (GEMA, S.C)

*Autor de correspondencia

Resumen

La influencia de las actividades humanas sobre los ecosistemas se ha extendido por casi toda la superficie terrestre; sin embargo, existen todavía algunos con perturbación escasa que son considerados primarios. El objetivo fue caracterizar y comparar la estructura arbórea en cuatro localidades con bosques mixtos maduros considerados primarios, cuyo dosel es dominado por *Picea martinezii*. En ellas se estableció un sitio de 2500 m² en donde se registró información dasométrica de todos los individuos arbóreos, misma que fue analizada con índices estructurales como Clark y Evans (R), mezcla de especies (Mi), diferenciación (Ti) y dominancia dimensional (Ui). El análisis general indicó una distribución aleatoria (R cercano 1), un grado de mezcla alto (Mi = 0.75) y una diferenciación y dominancia dimensional equilibrada (valores de Ti y Ui cercanos a 0.50). Las condiciones estructurales estables y favorables que presentan estas comunidades remarcán la importancia ambiental de seguir conservándolas, ya que estas representan un gran potencial para la provisión de servicios ambientales y conservación de biodiversidad.

Palabras clave: Noreste de México; distribución espacial arbórea; mezcla de especies; dominancia dimensional.

Abstract

The influence of human activities on ecosystems has spread over almost the entire earth's surface; however, there are still some with little or no activity that are considered primary. The objective was to characterize and compare the tree structure in four localities in old-growth mixed forests considered primary, with *Picea martinezii* as a dominating species. In those areas, a site of 2500 m² was established, where dasometric information of all tree individuals was recorded and analyzed with structural indices such as Clark and Evans (R), species mixture (Mi), differentiation (Ti), and dimensional dominance (Ui). The general analysis indicated a random distribution (R close to 1), with a high degree of mixing (Mi = 0.75) and balanced differentiation and dimensional dominance (Ti and Ui values close to 0.50). It is concluded that the studied forests have similar and stable structural conditions.

Keywords: Northeast of Mexico; tree spatial distribution; species mix; dimensional dominance.

Recibido: 28 de junio de 2023

Aceptado: 18 de octubre de 2023

Publicado: 29 de noviembre de 2023

Cómo citar: López Martínez, J. I., Treviño Garza, E. J., Aguirre Calderón, O. A., & Mata Balderas, J. M. (2023). Estructura arbórea en bosques primarios de *Picea martinezii* T.F. Patterson. *Acta Universitaria* 33, e3927. doi: <http://doi.org/10.15174/au.2023.3927>

Introducción

Se considera que casi una tercera parte de los bosques a nivel mundial son primarios, es decir, ecosistemas con especies nativas, los cuales se regeneran de manera natural, en los que la actividad humana es apenas perceptible y donde los procesos ecológicos no sufren perturbaciones destacables (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2020). En el noreste de México se desarrollan bosques mixtos que en su mayoría son dominados por especies de los géneros *Pinus* y *Quercus*. Sin embargo, también se distribuyen especies arbóreas de la región biogeográfica Neártica, que crecen en condiciones climáticas extremas (baja humedad y alta temperatura) y son en algunos casos endémicas para una región (Treviño, 2017). Los bosques conformados por este tipo de especies son considerados relictos, ya que muestran una estructura única, con predominio de árboles maduros y bajo grado de perturbación; conservan una alta biodiversidad; y tienen la posibilidad de brindar servicios ambientales (Cruz *et al.*, 2014).

El bosque donde se desarrolla *Picea martinezii* T.F. Patterson (una de las 38 especies de este género que existen a nivel mundial) es un ejemplo de bosque maduro, con escasa perturbación. *Picea chihuahuana* Martínez, *P. mexicana* Martínez y *Picea martinezii* son las únicas especies del género que se distribuyen en México (Germandt & Pérez-de la Rosa, 2014). La madera de *Picea* es considerada de alto valor comercial en muchas partes del mundo; sin embargo, en México, debido al bajo número de individuos y a la reducción en el tamaño del área de distribución de sus poblaciones, las tres especies se encuentran en peligro de extinción, por lo que no está permitido su aprovechamiento maderable (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2010; Thomas & Farjon, 2013).

En el caso particular de *Picea martinezii*, su área de distribución se restringe a algunas localidades con bosques mixtos de coníferas en el noreste de México, en el estado de Nuevo León, donde frecuentemente coexisten con especies arbóreas de los géneros *Abies*, *Carpinus*, *Carya*, *Cornus*, *Ilex*, *Pinus*, *Pseudotsuga*, *Quercus*, *Taxus*, y *Tilia*, entre otros (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad-Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas [Conabio-Conanp], 2009).

Al no ser posible el aprovechamiento forestal de *Picea*, los ecosistemas forestales donde crece se mantienen con bajo grado de perturbación, por lo que son de gran importancia ecológica debido a que proveen de servicios ecosistémicos a las poblaciones humanas aledañas. Por lo antes mencionado, surge la necesidad de estudiar distintos aspectos ecológicos de las especies de este género para aportar información básica que pueda ser de utilidad en la toma de decisiones sobre el manejo y conservación de estos ecosistemas. Hasta ahora se han realizado varios estudios sobre *Picea martinezii* y las comunidades forestales donde se distribuye, destacando los trabajos sobre diversidad genética (Ledig *et al.*, 2000a), distribución de sus poblaciones (Ledig *et al.*, 2000b), relación genética entre las especies (Ledig *et al.*, 2004), efectos del cambio climático (Ledig, 2012), indicadores reproductivos (Flores-López *et al.*, 2012) y propuestas de conservación (Mendoza-Maya *et al.*, 2015). Sin embargo, es necesario realizar investigaciones sobre varios aspectos que aún no se han explorado, como la dinámica de sus poblaciones y sus características estructurales (Wehenkel *et al.*, 2022).

La estructura de un ecosistema se relaciona con la forma en que los atributos de los árboles se distribuyen dentro de los mismos (Larson & Funk, 2016) y se puede caracterizar a diferentes niveles de estudio, como el horizontal, el florístico y el dimensional (Aguirre, 2002). Para cuantificar la estructura arbórea, es común utilizar índices que estiman sus patrones de distribución espacial y que están basados en relaciones de vecindad, como el índice de agregación espacial R de Clark & Evans (1954), que sirve para analizar la estructura horizontal y describir la distribución espacial del arbolado (Vandekerkhove et al., 2018); el índice de mezcla de especies, utilizado para analizar la estructura florística; y los índices de diferenciación y dominancia, que se usa para analizar la estructura dimensional (Gadow et al., 2012; Ghalandarayeshi et al., 2017).

El objetivo de este trabajo fue caracterizar y comparar la estructura arbórea a nivel horizontal, florístico y dimensional en cuatro localidades con ecosistemas forestales en donde se presenta *Picea martinezii* en el noreste de México. Considerando la similitud en las condiciones ambientales que se presentan en las cuatro comunidades estudiadas, se plantea la hipótesis de que la estructura arbórea y el estado de conservación también pueden ser semejantes.

Materiales y métodos

La investigación se realizó en cuatro localidades con *Picea martinezii* en el estado de Nuevo León, México: El Butano (25° 10.585' N, 100° 7.494' O), Agua de Alardín (24° 2.505' N, 99° 43.882' O), El Bosque (23° 53.414' N, 99° 46.438' O) y La Tinaja (23° 53.376' N, 99° 47.525' O) (Figura 1).

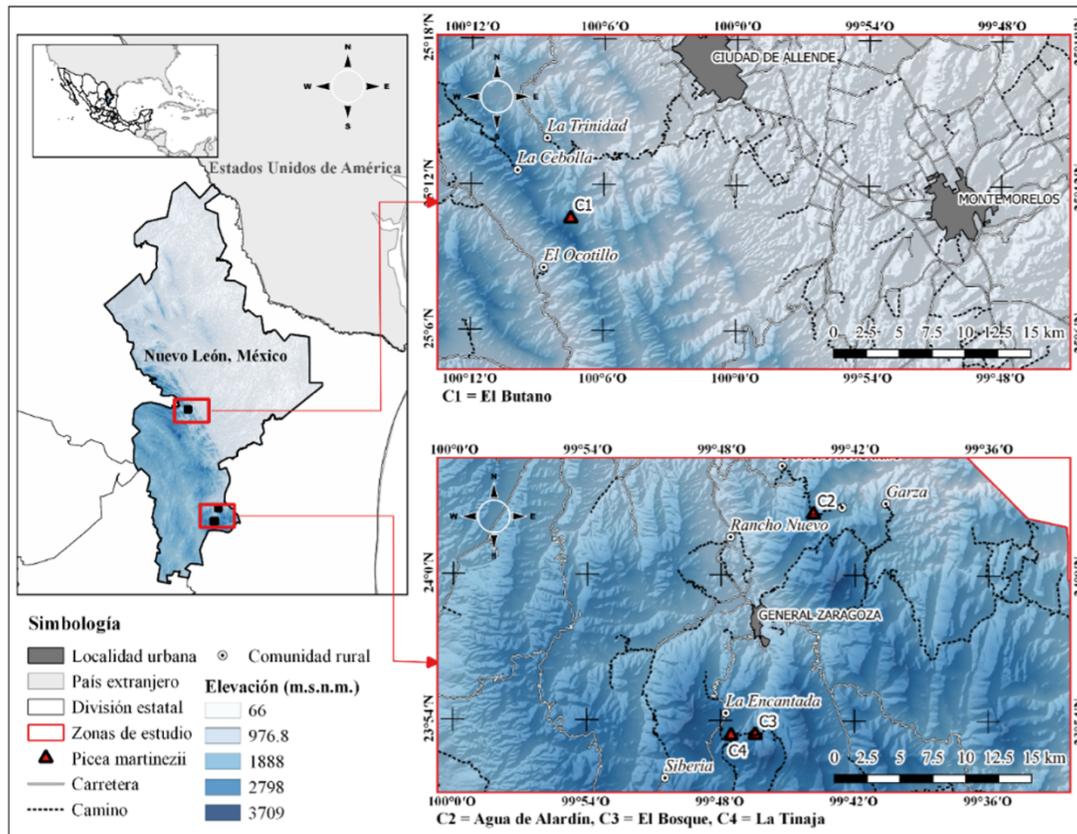


Figura 1. Ubicación de las cuatro comunidades forestales estudiadas.
Fuente: Elaboración propia.

En las cuatro localidades se presentan condiciones ambientales similares: se distribuyen en cañadas, con exposición norte, en la Sierra Madre Oriental (SMO), en un gradiente altitudinal que va de 2180 m a 2600 m (registrado en los sitios establecidos para este estudio). El clima que predomina es tipo C (w), que corresponde a templado subhúmedo (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2008), con precipitación media anual de 700 mm - 800 mm (INEGI, 2006) y temperatura media anual entre 12 °C y 16 °C (INEGI, 2007). El suelo tipo leptosol predomina en todas las comunidades (INEGI, 2013). Las condiciones ambientales mencionadas favorecen el establecimiento y desarrollo de especies arbóreas típicas del bosque mesófilo de montaña de los géneros *Abies*, *Carya*, *Cornus*, *Ilex*, *Picea*, *Pinus*, *Quercus*, *Taxus*, entre otras (Rzedowski, 2006), incluyendo a *Picea martinezii*, y otras coníferas consideradas en alguna categoría de riesgo como *Abies vejarii* Martínez, *Taxus globosa* Schltdl. y *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco (Treviño, 2017). Entre las localidades analizadas, sólo El Butano se encuentra dentro de un área natural protegida.

Los datos fueron obtenidos en cuatro unidades de muestreo permanentes de 2500 m² (50 m X 50 m) establecidas en el año 2016 (una unidad por localidad). Según el método propuesto por Corral-Rivas *et al.* (2009), cada unidad se dividió en cuatro cuadros de 625 m² (25 m x 25 m), y en cada uno de ellos se realizó el inventario de todos los árboles con diámetro a 1.30 m (Dn) mayor de 7.5 cm. Se registraron los datos del género, especie, Dn, altura total y distancia (metros) y azimut (grados), con respecto al centro de la unidad de muestreo.

Para analizar la estructura arbórea a nivel horizontal, florístico y dimensional se emplearon los índices que se indican en la Tabla 1. Los valores se calcularon de manera general (tomando en cuenta todas las especies) y por grupo (considerando los géneros más representativos). Con excepción del índice de Clark & Evans (1954), los índices empleados se basan en el método de los cinco árboles, que consideran un árbol de referencia y sus cuatro vecinos más cercanos (Gadow *et al.*, 2012).

El índice R propuesto por Clark & Evans (1954), empleado para caracterizar la estructura horizontal, permite conocer la manera y el grado de distribución espacial de los individuos. El índice de mezcla (Mi) empleado para caracterizar la estructura florística, define la proporción de árboles vecinos que pertenecen a especies diferentes, con respecto a un árbol de referencia *i* (Rubio-Camacho *et al.*, 2017).

Los índices de diferenciación (Ti) y dominancia (Ui), empleados para caracterizar la estructura dimensional, describen la diferenciación por dimensiones, definida como una medida de la proximidad espacial existente entre árboles de diferentes medidas dentro de un rodal. Para su determinación se puede considerar cualquier variable que represente el tamaño de un árbol (García-García *et al.*, 2022; Silva-González *et al.*, 2022); para efectos de esta investigación se empleó el Dn.

Tabla 1. Índices empleados para caracterizar la estructura arbórea.

Índice	Símbolos y definiciones	Clasificación
Agregación (Clark & Evans, 1954) $R = \frac{\bar{r}_A}{\bar{r}_E}$	N Número de medidas de distancia tomadas	
	r Cada distancia tomada	
	ρ Número de individuos	R entre 0.00-0.49 (Agrupación)
	Σr Suma de las medidas de distancia	R entre 0.50-1.49 (Aleatoriedad)
	$\bar{r}_A = \frac{\Sigma r}{N}$ Distancia media	R entre 1.50-2.149 (Uniformidad)
	$\bar{r}_E = \frac{1}{2\sqrt{\rho}}$ Distancia media esperada	
Mezcla de especies (Gadow <i>et al.</i> , 2012) $M_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n v_j$	n Número de árboles vecinos considerados (cuatro en este caso)	$M_i = 0.00$ (Mezcla nula) $M_i = 0.25$ (Mezcla baja)
	v_j Toma uno de dos posibles valores: en caso de que la especie j sea diferente a la especie de referencia i , el valor asignado será de 1, y tomará un valor de 0 en caso contrario.	$M_i = 0.50$ (Mezcla intermedia) $M_i = 0.75$ (Mezcla alta) $M_i = 1.00$ (Mezcla muy alta)
Diferenciación dimensional (Gadow <i>et al.</i> , 2012) $T_i = 1 - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{\min(d_i, d_j)}{\max(d_i, d_j)}$	n Número de árboles vecinos considerados (cuatro en este caso)	$T_i = 0.00$ (Diferenciación nula) $T_i = 0.25$ (Diferenciación baja)
	$\min(d_i, d_j)$ Diámetro menor del árbol de referencia i o el del árbol vecino j	$T_i = 0.50$ (Diferenciación intermedia) $T_i = 0.75$ (Diferenciación alta)
	$\max(d_i, d_j)$ Diámetro máximo del árbol de referencia i o el del árbol vecino j	$T_i = 1.00$ (Diferenciación muy alta)
Dominancia dimensional (Aguirre <i>et al.</i> , 2003) $U_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n v_j$	n Número de árboles vecinos considerados (cuatro en este caso)	$U_i = 0.00$ (Dominancia nula) $U_i = 0.25$ (Dominancia baja)
	v_j Toma uno de dos posibles valores: en caso de que la especie j sea diferente a la especie de referencia i , el valor asignado será de 1, y tomará un valor de 0 en caso contrario.	$U_i = 0.50$ (Dominancia intermedia) $U_i = 0.75$ (Dominancia alta) $U_i = 1.00$ (Dominancia muy alta)

Fuente: Elaboración propia.

Para calcular los índices y realizar los análisis estadísticos correspondientes, se utilizó el *software* libre R® versión 3.3.3 (R Core Team, 2017), junto con el script TreeDiversityIndices.R (Pommerening *et al.*, 2011) y la caja de herramientas llamada SPATSTAT® versión 1.54-0 (Baddeley *et al.*, 2017). Los análisis estadísticos se realizaron según lo establecido por Wackerly *et al.* (2008) y Dytham (2011). Primero, se efectuaron pruebas para verificar si los datos obtenidos a partir de los índices cumplían con los supuestos de normalidad y homocedasticidad, donde se encontró que sólo los índices R y T_i cumplían con estos supuestos. En ambos casos se empleó un análisis de varianza (Anova) para probar diferencias entre comunidades, el resto fueron sometidos a una prueba de Kruskal–Wallis. Finalmente, se realizaron pruebas de comparación múltiple de Tukey para identificar diferencias estadísticas por pares entre comunidades.

Resultados

Se registraron 19 especies arbóreas representadas por 12 géneros, las cuales fueron consideradas para analizar y comparar la estructura general del bosque. De los géneros, los que presentaron mayor densidad y dimensiones y que se encontraron en todas las comunidades fueron *Abies*, *Picea*, *Quercus* y *Taxus* (Tabla 2), por lo que estos fueron empleados en la comparación por grupos para analizar su comportamiento estructural particular.

Tabla 2. Características dasométricas de los individuos arbóreos registrados.

No.	Especie	Densidad (N ha ⁻¹)				Dn (cm)				Altura (m)			
		But	Alar	Bos	Tin	But	Alar	Bos	Tin	But	Alar	Bos	Tin
1	<i>Picea martinezii</i> T.F.Patt.	72	36	52	128	21.5	38.8	13.5	19.9	14.7	19.8	11.7	16.0
2	<i>Abies vejarii</i> Martínez	-	84	224	64	-	22.2	22.3	25.7	-	12.3	16.9	23.3
3	<i>Abies durangensis</i> var. <i>Coahuilensis</i> (I.M.Johnst.) Martínez	216	-	-	-	20.6	-	-	-	16.2	-	-	-
4	<i>Quercus affinis</i> Scheidw.	-	36	124	-	-	34.6	20.8	-	-	16.2	13.0	-
5	<i>Quercus glaucooides</i> M.Martens & Galeotti	16	-	-	-	12.1	-	-	-	11.8	-	-	-
6	<i>Quercus greggii</i> (A.DC.) Trel.	8	-	-	-	10.7	-	-	-	6.7	-	-	-
7	<i>Quercus mexicana</i> Bonpl.	-	4	-	-	-	13.3	-	-	-	8.5	-	-
8	<i>Quercus sartorii</i> Liebm.	64	40	-	-	22.2	34.2	-	-	13.0	13.7	-	-
9	<i>Quercus laurina</i> M.Martens & Galeotti	-	-	100	68	-	-	23.2	37.6	-	-	13.0	17.5
10	<i>Quercus sideroxylla</i> Bonpl.	-	-	36	-	-	-	38.6	-	-	-	13.6	-
11	<i>Taxus globosa</i> Schtdl.	124	92	56	48	19.2	16.1	14.4	19.0	6.7	7.1	6.2	11.6
12	<i>Ilex rubra</i> S.Watson	128	-	-	-	23.2	-	-	-	14.6	-	-	-
13	<i>Carpinus caroliniana</i> Walter	44	12	8	-	14.1	22.2	20.1	-	9.0	14.0	12.9	-
14	<i>Sambucus nigra</i> Lour.	4	-	-	-	17.1	-	-	-	8.4	-	-	-
15	<i>Cornus florida</i> L.	-	76	-	-	-	22.6	-	-	-	13.1	-	-
16	<i>Tilia americana</i> L.	-	44	-	-	-	17.5	-	-	-	5.2	-	-
17	<i>Arbutus xalapensis</i> Kunth	-	-	4	-	-	-	13.0	-	-	-	10.1	-
18	<i>Pinus ayacahuite</i> Ehrenb. ex Schtdl.	-	-	4	44	-	-	17.6	28.6	-	-	14.5	21.0
19	<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco	-	-	8	36	-	-	18.3	17.9	-	-	16.7	17.8

Nota. But = El Butano; Alar = Agua de Alardín; Bos = El Bosque; Tin = La Tinaja; Dn = Diámetro normal a la altura de 1.3 m.
Fuente: Elaboración propia.

En el análisis general (Tabla 3), se encontró que a nivel horizontal la distribución espacial de las especies arbóreas fue de tipo aleatoria, debido a que los valores de *R* fueron cercanos a 1 y no presentaron diferencias estadísticas significativas ($p > 0.05$). Esto implica que en las cuatro comunidades las especies arbóreas no tienden a agruparse ni a presentar un arreglo uniforme. A nivel florístico se presentó un alto grado de mezcla en la mayoría de los casos ($M_i = 0.75$), y sólo hubo diferencias significativas ($p < 0.05$) en la comunidad de El Bosque ($M_i = 0.50$), la cual fue clasificada como intermedia. En la estructura dimensional, los valores de los índices de diferenciación y dominancia se clasificaron como intermedios debido a que los valores de *T_i* y *U_i* fueron cercanos o iguales a 0.50, sin presentar diferencias estadísticas significativas entre comunidades ($p > 0.05$).

Tabla 3. Comparación de índices entre comunidades (análisis general).

Índice	But	Alar	Bos	Tin	p-valor
R (M)	1.05 a	0.88 a	0.87 a	0.81 a	0.318
Mi (Mdn)	0.75 a	0.75 a	0.50 b	0.75 a	0.000
Ti (M)	0.37 a	0.42 a	0.41 a	0.36 a	0.169
Ui (Mdn)	0.50 a	0.50 a	0.50 a	0.50 a	0.862

Nota. But = El Butano; Alar = Agua de Alardín; Bos = El Bosque; Tin = La Tinaja; M = valores promedio comparados con Anova; Mdn = valores de medianas comparados con Kruskal-Wallis. Valores en fila con diferente literal indican diferencias según prueba *post hoc* Tukey ($p < 0.05$).
Fuente: Elaboración propia.

En el análisis por géneros representativos (*Abies*, *Picea*, *Quercus* y *Taxus*), el índice R, al igual que el análisis general, indicó valores cercanos a 1 y no hubo diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$) entre comunidades (Tabla 4), lo que muestra que en las cuatro comunidades los géneros estudiados se distribuyen de forma aleatoria, tal como se ilustra en la Figura 2. La mezcla de especies indicó valores de Mi > 0.50 en la mayoría de los casos, con diferencias estadísticas en *Abies*, *Picea* y *Quercus* ($p < 0.05$) sólo en una comunidad (Tabla 4). Esto indica que los cuatro géneros tienden a coexistir en un grado que va de intermedio a alto y muy alto, siendo *Picea* el más común (Figura 2).

Tabla 4. Comparación de índices entre comunidades (análisis por grupo).

Índice	Género	But	Alar	Bos	Tin	p-valor
R (M)	<i>Picea</i>	1.18 a	0.85 a	1.33 a	1.06 a	0.686
	<i>Abies</i>	1.24 a	0.89 a	0.90 a	1.31 a	0.604
	<i>Taxus</i>	1.35 a	1.24 a	1.17 a	1.61 a	0.752
	<i>Quercus</i>	1.08 a	0.98 a	0.94 a	1.20 a	0.806
Mi (Mdn)	<i>Picea</i>	1.00 a	1.00 a	0.87 a	0.50 b	0.000
	<i>Abies</i>	0.75 ab	0.37 a	0.50 a	1.00 b	0.000
	<i>Taxus</i>	0.75 a	0.75 a	1.00 a	0.62 a	0.119
	<i>Quercus</i>	0.75 a	0.75 a	0.25 b	1.00 a	0.000
Ti (M)	<i>Picea</i>	0.44 ab	0.52 a	0.45 ab	0.31 b	0.030
	<i>Abies</i>	0.33 a	0.34 a	0.40 a	0.31 a	0.138
	<i>Taxus</i>	0.38 a	0.35 a	0.37 a	0.50 a	0.323
	<i>Quercus</i>	0.43 a	0.49 a	0.30 a	0.40 a	0.485
Ui (Mdn)	<i>Picea</i>	0.37 a	0.75 a	0.25 a	0.25 a	0.145
	<i>Abies</i>	0.75 a	0.50 a	0.50 a	0.62 a	0.701
	<i>Taxus</i>	0.50 a	0.25 a	0.25 a	0.50 a	0.219
	<i>Quercus</i>	0.50 a	0.75 a	0.50 a	1.00 a	0.069

Nota. But = El Butano; Alar = Agua de Alardín; Bos = El Bosque; Tin = La Tinaja; M = valores promedio comparados con Anova; Mdn = valores de medianas comparados mediante Kruskal-Wallis. Valores en fila con diferente literal indican diferencias según la prueba *post hoc* de Tukey ($p < 0.05$).
Fuente: Elaboración propia.

El índice de diferenciación dimensional (T_i) presentó valores cercanos a 0.50 en los cuatro géneros, con diferencias estadísticas significativas sólo para *Picea* entre las comunidades Agua de Alardín y La Tinaja. Sin embargo, sus valores se clasifican en el mismo grado de diferenciación (Tabla 4), con lo que se asume que por lo general la mitad de los árboles que los rodean (dos individuos) son de diferente tamaño (Figura 2).

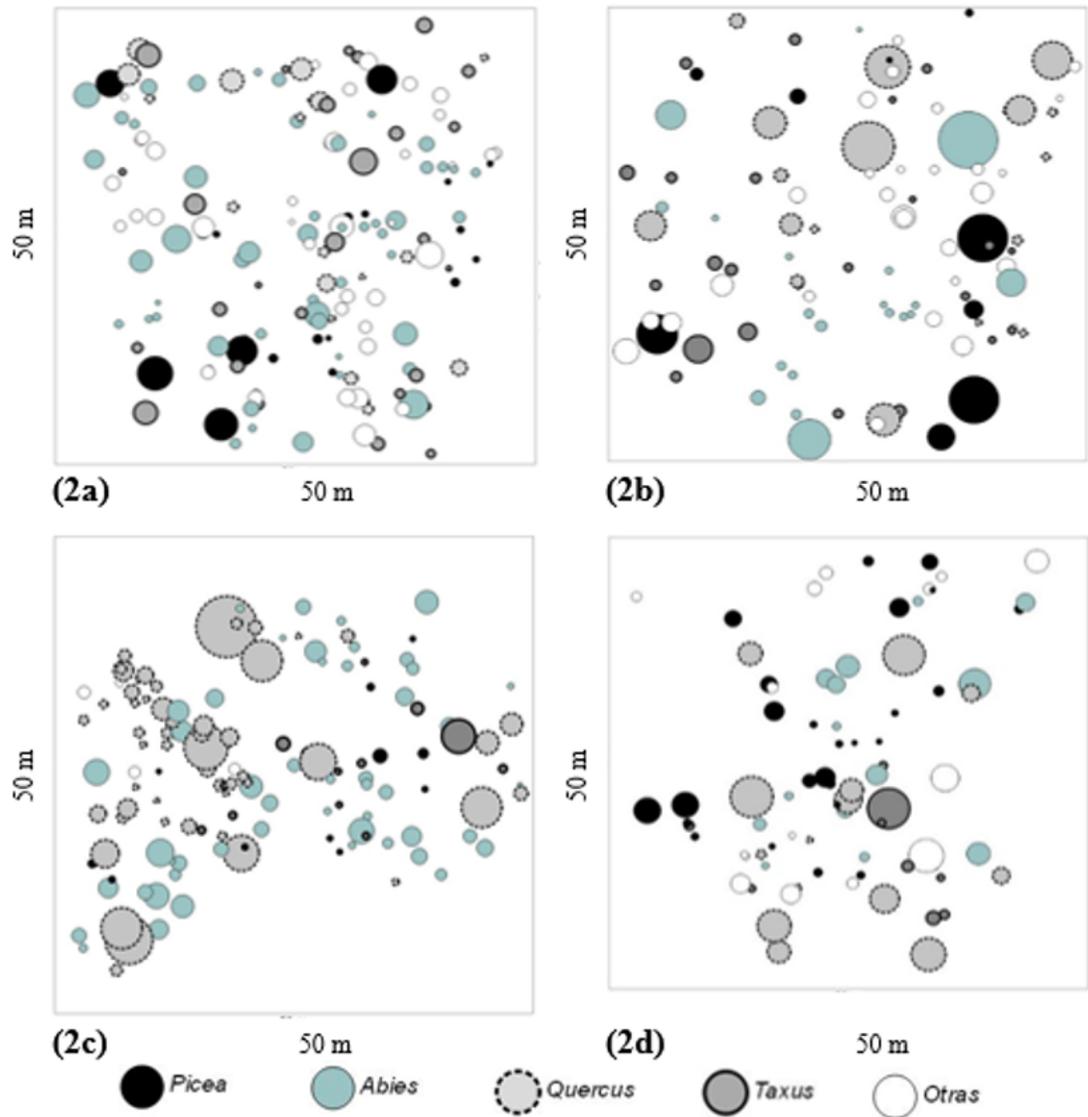


Figura 2. Distribución espacial y dimensional de todos los géneros arbóreos registrados en las cuatro comunidades estudiadas. (2a) El Butano, (2b) Agua de Alardín, (2c) El Bosque, (2d) La Tinaja. Los círculos representan los árboles de acuerdo con su respectivo diámetro normal a la altura de 1.3 m.

Fuente: Elaboración propia.

Por su parte, el índice de dominancia dimensional en diámetro (U_i) mostró que, de los cuatro géneros representativos, *Picea* y *Taxus* fueron los menos dominantes debido a que sus valores de U_i se clasificaron como bajos, intermedios y altos, mientras que *Abies* y *Quercus* fueron los más dominantes, ya que sus valores de U_i se clasificaron entre intermedios, altos y muy altos, sin presentar diferencias importantes entre comunidades (Tabla 4). Este patrón se puede apreciar mejor en la Figura 3, donde se observa que *Abies* y *Quercus* generalmente están bien representados en categorías diamétricas de tamaño considerable (de 25 cm a 40 cm), lo que aumenta su dominancia; mientras que *Picea* y *Taxus* están mejor representados en las primeras categorías, principalmente (5 cm a 20 cm), lo que los convierte en los menos dominantes.

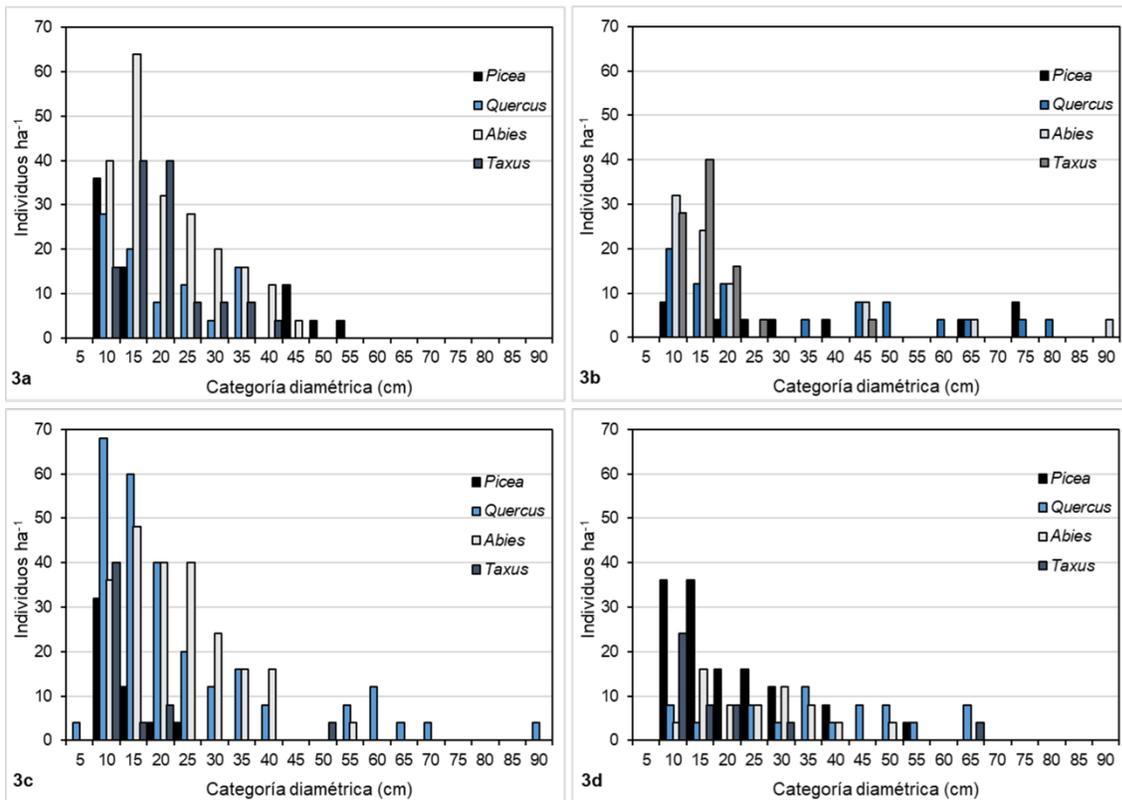


Figura 3. Categorización diamétrica de géneros representativos. (3a) El Butano, (3b) Agua de Alardín, (3c) El Bosque, (3d) La Tinaja. Fuente: Elaboración propia.

Discusión

La distribución espacial de la estructura horizontal mostró que *Picea martinezii* y otras especies arbóreas que coexisten tienden a distribuirse de manera aleatoria. Este tipo de distribución es el resultado de la respuesta de los árboles a los procesos naturales que se llevan a cabo dentro de las comunidades, tales como la dispersión y el establecimiento de los individuos bajo condiciones lumínicas específicas (Götzenberger *et al.*, 2012; Yan *et al.*, 2018), que en el presente estudio ocurrieron en las especies más representativas: *Abies* spp., *Picea martinezii*, *Quercus* spp. y *Taxus globosa*. Aunado a lo anterior, se ha demostrado que los patrones de distribución espacial tienden a ser de forma agrupada cuando los individuos son jóvenes (plántulas o regeneración) y se convierten en aleatorios cuando las plantas llegan a edades intermedias y adultas, debido a que en estas etapas generalmente se desarrollan en los claros que se forman al azar bajo el dosel (Omelko *et al.*, 2018).

Es posible que el patrón mencionado en el párrafo previo se esté presentando en las comunidades forestales estudiadas, pues se asume que los árboles se encuentran en edades intermedias y adultas. Como no se registraron individuos < 7.5 cm de diámetro, considerados como parte de la regeneración, la distribución espacial de las especies es aleatoria. Se considera que este tipo de distribución es característica de las comunidades forestales estudiadas y, además, se sugiere que en dichas comunidades no se han presentado disturbios antropogénicos fuertes recientemente (por ejemplo, aprovechamientos maderables intensivos), con ello se deduce que este tipo de distribución es característica de bosques de clima templado, donde habitan otras especies de *Picea* en México, así como en otros bosques mixtos de coníferas sin aprovechamiento forestal (Qindi *et al.*, 2012; Wehenkel *et al.*, 2015).

En el análisis general de la estructura florística, el alto grado de mezcla que presentaron las especies arbóreas en la mayoría de las comunidades, con excepción de El Bosque, sugieren que existe gran acumulación de casos donde tres de los cuatro árboles que rodean al de referencia son de especies diferentes. Esto se debe a que una gran proporción de especies presentan baja densidad y solo en una minoría la densidad es alta, ya que, según Juárez-Sánchez *et al.* (2014), existe relación entre la densidad de individuos y el grado de mezcla. Es decir, a medida que la densidad de un alto número de especies disminuye, el índice de mezcla aumenta. En el caso particular de la comunidad El Bosque, los resultados sugieren que la mitad de las especies presenta baja densidad y la otra mitad presenta densidad alta, por esta razón el grado de mezcla se clasificó como intermedio. Esta relación fue encontrada también en el análisis por grupo, donde los géneros *Picea* y *Taxus* en gran parte de las comunidades presentaron el mayor grado de mezcla, lo que coincide con el bajo número de árboles que se presentan.

En el caso particular de *Picea martinezii*, la baja densidad se atribuye a los problemas genéticos que enfrenta (Flores-López *et al.*, 2012; Ledig *et al.*, 2000a). A pesar de esta situación, se considera que la estructura florística de las comunidades donde habita la especie es estable e incluso puede ser mejor a la que presentan otras comunidades forestales de clima templado en México, donde los grados de mezcla tienden a ser generalmente intermedios (Juárez-Sánchez *et al.*, 2014; Rubio-Camacho *et al.*, 2017). Es probable que un alto grado de mezcla, como el encontrado en la mayoría de las comunidades estudiadas, favorezca la competencia entre individuos de diferentes especies, lo cual se ha demostrado tiende a ser menos fuerte en comunidades forestales donde habitan especies del género *Picea* y otras especies arbóreas de clima templado-frío (Cavard *et al.*, 2011; Erfanfard *et al.*, 2019; Torimaru *et al.*, 2013). Por lo tanto, el establecimiento y crecimiento de las especies arbóreas que coexisten en estas comunidades es más propicio.

Las condiciones favorables de competencia entre árboles de diferente especie se ven reflejadas en los resultados obtenidos de la estructura dimensional, donde la diferenciación intermedia observada en el análisis general, y por grupo, sugiere que en todas las comunidades las especies arbóreas presentan distribución equilibrada en el tamaño de sus diámetros. De acuerdo con Ghalandarayeshi *et al.* (2017), el grado de diferenciación está relacionado con las dimensiones de los árboles y tiende a incrementar a medida que aumentan de tamaño, como resultado de la competencia, las condiciones del micrositio y la composición genética. De todo esto se deduce que la diferenciación intermedia que presentan las cuatro comunidades, en términos de dimensiones diamétricas, indica un estado de competencia equilibrado que obedece a condiciones de micrositio y composición genética similares. En adición, la dominancia intermedia encontrada también en el análisis general recalca el estado de competencia que presentan las comunidades, el cual, aunque no es tan elevado, propicia la dominancia en diámetro de algunas especies sobre otras.

Según Lutz *et al.* (2012), la dominancia está determinada por los géneros más representativos de cada comunidad. En este caso, el análisis por grupos indicó que, de los cuatro géneros más representativos presentes en las cuatro comunidades, *Abies* y *Quercus* y resultaron ser los más dominantes en diámetro, mientras que *Picea* y *Taxus* resultaron tener menor dominancia. En los ecosistemas templados del noreste de México se ha demostrado que *Abies* y *Quercus*, cuando se encuentran asociados, tienden a ser dominantes y se distinguen de los demás por presentar mayor dimensión (González *et al.*, 2018). Para los individuos de *Taxus globosa*, el valor de dominancia menor es característico de este tipo de vegetación, debido a que suelen presentar dimensiones menores y casi siempre se encuentran en los estratos inferiores y medios de dosel en bosques montanos (Thomas, 2013). Es frecuente que los individuos de *Picea martinezii* sean dominantes, considerando las dimensiones que pueden llegar a alcanzar (Conabio-Conanp, 2009). Sin embargo, presentan baja densidad, lo cual, como ya se había mencionado, se atribuye a problemas genéticos que enfrenta la especie. Lo anterior está ocasionando la producción de semillas inviables (óvulos abortados, rudimentarios y semillas vacías), han estado mermando la incorporación de nuevos individuos de esta especie a pesar de poseer múltiples ciclos reproductivos y ser de larga vida, por lo que ha soportado estas presiones, permitiendo que sobrevivan durante muchos años (Flores-López *et al.*, 2012; Ledig *et al.*, 2000a).

Se considera que la reducción en la incorporación de nuevos individuos de *Picea martinezii* ha estado generando condiciones favorables para el establecimiento de especies como las del género *Quercus*, las cuales se ha demostrado que se establecen mejor en ecosistemas forestales que presentan algún tipo de disturbio (e.g., incendios forestales) (Brewer, 2015). Incluso, como en este caso, la reducción en la incorporación de individuos de *Picea martinezii* causa problemas genéticos, lo que en el largo plazo podría representar un reto más para el establecimiento de las plántulas de esta especie e implicar cambios estructurales, principalmente en la estructura florística, como es el caso de la comunidad El Bosque, donde se considera que ya se están presentando debido a que los grados de mezcla tienden a ser menores a los que presentan las demás comunidades.

Conclusiones

La estructura horizontal y dimensional que presentan las comunidades estudiadas es similar, a excepción de la localidad El Bosque. En estas comunidades, las especies arbóreas se distribuyen espacialmente de manera aleatoria, con altos grados de mezcla que dan origen a un estado de competencia entre individuos de diferentes especies, lo que es favorable para su establecimiento y crecimiento.

Las condiciones estructurales estables y favorables que presentan estas comunidades remarcen la importancia ambiental de seguir conservándolas, donde a pesar de que no se pueden realizar aprovechamientos forestales, estas representan un gran potencial para la provisión de servicios ambientales y la conservación de biodiversidad.

Con el análisis de la estructura de las comunidades estudiadas, se considera factible el recuperar áreas con características ecológicas similares cercanas a las estudiadas mediante trabajos de restauración utilizando germoplasma obtenido en estos sitios, tratando de replicar las condiciones estructurales de las especies arbóreas, conservando la diversidad florística y promoviendo de esta manera el reclutamiento de especies arbustivas y arbóreas.

Agradecimientos

A los Sres. Paulo Hernández Lucio y Manuel Casas, comisariados de los ejidos La Encantada y La Trinidad respectivamente, por las facilidades brindadas.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Referencias

- Aguirre, O. A. (2002). Índices para la caracterización de la estructura del estrato arbóreo de ecosistemas forestales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 27(92), 5-27. <http://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/900>
- Baddeley, A., Turner, R., & Rubak, E. (2017). Spatial point patterns: methodology and applications with R. *Mathematical Geosciences*, 49, 815-817. <https://doi.org/10.1007/s11004-016-9670-x>
- Brewer, J. S. (2015). Changes in tree species composition and stand structure in a mature upland oak-dominated forest reflect differences in recruitment, survival, and longevity. *Natural Areas Journal*, 35(4), 550-557. <https://doi.org/10.3375/043.035.0407>
- Cavard, X., Bergeron, Y., Chen, H. Y. H., Paré, D., Laganière, J., & Brassard, B. (2011). Competition and facilitation between tree species change with stand development. *Oikos*, 120(11), 1683-1695. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2011.19294.x>
- Clark, P. J., & Evans, F. C. (1954). Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationships in populations. *Ecology*, 35(4), 445-453. <https://doi.org/10.2307/1931034>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad-Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conabio-Conanp) (2009). *Pinabete de Nuevo León (Picea martinezii)*. <https://docplayer.es/38596837-Pinabete-de-nuevo-leon.html>

- Corral-Rivas, J. J., Vargas-Larreta, B., Wehenkel, C., Aguirre-Calderón, O. A., Álvarez-González, J. G., & Rojo-Alboreca, A. (2009). *Guía para el establecimiento de sitios de investigación forestal y de suelos en bosques del estado de Durango*. Editorial UJED.
http://forestales.ujed.mx/monafor/archivos/descargas/guias_manuales/Guia_para_el_Establecimiento_Seguimiento_y_Evaluaci%C3%B3n_de_Sitios_Permanetes_de_Monitoreo.pdf
- Cruz, M., Torres, F., Cruz, J., Torres, F. A., & Cervantes, A. (2014). *Manual de Mejores Prácticas Forestales para Establecer una Red de Bosques Antiguos y Recuperación de Poblaciones de la Cotorra Serrana Occidental (Rhynchopsitta pachyrhyncha) en las Áreas de Protección Flora y Fauna Tutuaca y Papigochic. Programa de Conservación de Especies en Riesgo (PROCER) de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas* [Producto del Convenio de Concertación Número PROCER/DRNSMO/007/2014].
<https://simec.conanp.gob.mx/Publicaciones2020/Publicaciones%20CONANP/Parte%203/Manuales/2014%20Mejores%20practicas%20forestales.pdf>
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2010). Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, *Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). https://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5173091
- Dytham, C. (2011). *Choosing and using statistics: a biologist's guide* (3ra Ed.). Wiley-Blackwell a John Wiley & Sons, Ltd. Publication.
- Erfanifard, Y., Stereńczak, K., & Miścicki, S. (2019). Management strategies alter competitive interactions and structural properties of Norway spruce in mixed stands of Białowieża Forest, Poland. *Forest Ecology and Management*, 437, 87-98. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.01.035>
- Flores-López, C., Geada-López, C. G., López-Upton, C. J., & López-Ramírez, E. (2012). Producción de semillas e indicadores reproductivos en poblaciones naturales de *Picea martinezii* T. F. Patterson. *Revista Forestal Baracoa*, 31(2), 49-58.
https://scholar.google.es/scholar?cluster=17118688568376036595&hl=es&as_sdt=0,5
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2020). *El estado de los bosques del mundo 2020. Los bosques, la biodiversidad y las personas*. <https://doi.org/10.4060/ca8642es>
- Gadow, K. V., Zhang, C. Y., Wehenkel, C., Pommerening, A., Corral-Rivas, J., Korol, M., Myklush, S., Hui, G. Y., Kivistek, A., & Zhao, X. H. (2012). Forest structure and diversity. en T. Pukkala & K. Gadow (eds.), *Continuous cover forestry. Managing Forest Ecosystems, vol 23*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-2202-6_2
- García-García, S. A., Alanís-Rodríguez, E., Rubio-Camacho, E. A., Aguirre-Calderón, O. A., Treviño-Garza, E. J., & Graciano-Ávila, G. (2022). Patrones de distribución espacial del arbolado en un bosque de *Pseudotsuga menziesii* en Chihuahua, México. *Madera y Bosques*, 27(3), 1-15.
<https://doi.org/10.21829/myb.2021.2732242>
- Gernandt, D. S., & Pérez-de la Rosa, J. A. (2014). Biodiversidad de Pinophyta (coníferas) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85(1), 126-133. <https://doi.org/10.7550/rmb.32195>
- Ghalandarayeshi, S., Nord-Larsen, T., Johannsen, V. K., & Larsen, J. B. (2017). Spatial patterns of tree species in Suserup Skov—a semi-natural forest in Denmark. *Forest Ecology and Management*, 406, 391-401. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.10.020>
- González, R., Treviño-Garza, E. J., Duque-Montoya, A., González, M. A., Gómez-Cárdenas, M., Bautista-Cruz, A. (2018). Diversidad y estructura arbórea en un bosque de *Abies vejarii* Martínez en el sur del estado de Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(45), 36-64.
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i45.142>
- Götzenberger, L., de Bello, F., Bräthen, K. A., Davison, J., Dubuis, A., Guisan, A., Lepš, J., Lindborg, R., Moora, M., Pärtel, M., Pellissier, L., Pottier, J., Vittoz, P., Zobel, K., & Zobel, M. (2012). Ecological assembly rules in plant communities—approaches, patterns and prospects. *Biological Reviews*, 87(1), 111-127.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.2011.00187.x>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2006). [Conjunto de datos vectoriales escala 1: 1 000 000. Precipitación media anual]. <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2007). [Conjunto de datos vectoriales escala 1: 1 000 000. Temperatura media anual]. <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2008). [Conjunto de datos vectoriales escala 1: 1 000 000. Unidades climáticas]. <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia>

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2013). [Conjunto de datos de Perfiles de suelos. Escala 1:250 000. Serie II (Continuo Nacional)]. <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia>
- Juárez-Sánchez, M., Domínguez-Calleros, P. A., & Nívar-Chaidez, J. (2014). Análisis de la estructura silvícola en bosques de la Sierra de San Carlos, Tamaulipas, México. *Foresta Veracruzana*, 16(1), 24-34. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49731008004>
- Larson, J. E., & Funk, J. L. (2016). Regeneration: an overlooked aspect of trait-based plant community assembly models. *Journal of Ecology*, 104(5), 1284-1298. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12613>
- Ledig, F. T. (2012). Climate change and conservation. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, 8(1), 57-74. <https://doi.org/10.2478/v10303-012-0005-4>
- Ledig, F. T., Bermejo-Velázquez, B., Hodgskiss, P. D., Johnson, D. R., Flores-López, C., & Jacob-Cervantes, V. (2000a). The mating system and genic diversity in Martínez spruce, an extremely rare endemic of Mexico's Sierra Madre Oriental: an example of facultative selfing and survival in interglacial refugia. *Canadian Journal of Forest Research*, 30(7), 1156-1164. <https://doi.org/10.1139/x00-052>
- Ledig, F. T., Mápula-Larreta, M., Bermejo-Velázquez, B., Reyes-Hernández, V., Flores-López, C., & Capó-Arteaga, M. A. (2000b). Locations of endangered spruce populations in Mexico and the demography of *Picea chihuahuana*. *Madroño*, 47(2), 71-88. <https://www.jstor.org/stable/41425349>
- Ledig, F. T., Hodgskiss, P. D., Krutovskii, K. V., Neale, D. B., & Eguiluz-Piedra, T. (2004). Relationships among the spruces (*Picea*, Pinaceae) of southwestern North America. *Systematic Botany*, 29(2), 275-295. <https://doi.org/10.1600/036364404774195485>
- Lutz, J. A., Larson, A. J., Swanson, M. E., & Freund, J. A. (2012). Ecological importance of large-diameter trees in a temperate mixed-conifer forest. *PloS ONE*, 7(5), e36131. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0036131>
- Mendoza-Maya, E., Espino-Espino, J., Quiñones-Pérez, C. Z., Flores-López, C., Wehenkel, C., Vargas-Hernández, J. J., & Saenz-Romero, C. (2015). Propuesta de conservación de tres especies mexicanas de *Picea* en peligro de extinción. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 38(3), 235-247. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-73802015000300002&script=sci_arttext
- Omelko, A., Ukhvatkina, O., Zhmerenetsky, A., Sibirina, L., Petrenko, T., & Bobrovsky, M. (2018). From young to adult trees: how spatial patterns of plants with different life strategies change during age development in an old-growth Korean pine-broadleaved forest. *Forest Ecology and Management*, 411, 46-66. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.01.023>
- Pommerening, A., LeMay, V., & Stoyan, D. (2011). Model-based analysis of the influence of ecological processes on forest point pattern formation—A case study. *Ecological Modelling*, 222(3), 666-678. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.10.019>
- Qindi, Z., Runcheng, B., Jintun, Z., Nyobe, L., Yanming, M., & Xiaoning, L. (2012). Dynamic analysis on spatial pattern of dominant tree species of cold-temperate coniferous forest in the succession process in the Pangquangou Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 32(18), 5713-5720. <https://doi.org/10.5846/stxb201108191220>
- R Core Team (2017). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Rubio-Camacho, E. A., González-Tagle, M. A., Himmelsbach, W., Ávila-Flores, D. Y., Alanís-Rodríguez, E., & Jiménez-Pérez, J. (2017). Patrones de distribución espacial del arbolado en un bosque mixto de pino-encino del noreste de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88(1), 113-121. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.01.015>
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México* (1ra ed.). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. https://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/VegetacionMx_Cont.pdf
- Silva-González, E., Aguirre-Calderón, O. A., Treviño-Garza, E. J., Alanís-Rodríguez, E., & Corral-Rivas, J. J. (2022). Efecto de tratamientos silvícolas en la diversidad y estructura forestal en bosques templados en Durango, México. *Madera y Bosques*, 27(2), 1-14. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2722082>
- Thomas, P., & Farjon, A. (2013). *Picea martinezii*. *The IUCN Red List of Threatened Species 2013: e.T32996A2829306*. <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2013-1.RLTS.T32996A2829306.en>
- Thomas, P. (2013). *Taxus globosa*. *The IUCN Red List of Threatened Species 2013: e.T30724A2795235*. <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2013-1.RLTS.T30724A2795235.en>

- Torimaru, T., Akada, S., Ishida, K., Matsuda, S., & Narita, M. (2013). Spatial associations among major tree species in a cool-temperate forest community under heterogeneous topography and canopy conditions. *Population Ecology*, 55(2), 261-275. <http://dx.doi.org/10.1007/s10144-013-0363-8>
- Treviño, G. E. J. (2017). Inventory and assessment of ecosystems with relict tree species as a tool for establishing criteria for public forest policy. En L. Fehrmann, A. Kleinn & C. Kleinn (eds.), *The science policy gap regarding informed decisions in forest policy and management. What scientific information are policy makers really interested in?* (pp. 3-10). Cuvillier Verlag. ISBN 3736984979
- Vandekerkhove, K., Vanhellemont, M., Vrška, T., Meyer, P., Tabaku, V., Thomaes, A., Leyman, A., De Keersmaeker, L. & Verheyen, K. (2018). Very large trees in a lowland old-growth beech (*Fagus sylvatica* L.) forest: density, size, growth and spatial patterns in comparison to reference sites in Europe. *Forest Ecology and Management*, 417, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.02.033>
- Wackerly, D. D., Mendenhall, W., & Scheaffer, R. L. (2008). *Mathematical Statistics with Applications* (7ma ed.). Thomson Learning. 912 p. ISBN-13: 978-0-495-11081-1 <https://www.nibmehub.com/opac-service/pdf/read/Mathematical%20Statistics%20with%20Applications-%207th%20Edition.pdf>
- Wehenkel, C., Brazão Protázio, J. M., Carrillo-Parra, A., Martínez-Guerrero, J. H., & Crecente-Campo, F. (2015). Spatial distribution patterns in the very rare and species-rich *Picea chihuahuana* tree community (Mexico). *PLoS ONE*, 10(10), e0140442. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0140442>
- Wehenkel, C., Mendoza-Maya, E., & Hernández-Díaz, J. C. (2022). Censo, estructura demográfica y diversidad arbórea de dos especies de *Picea*. En M. S. González-Elizondo & C. Wehenkel (eds.), *Las Piceas (Picea, Pinaceae) de México* (pp. 95-108). Comisión Nacional Forestal. <https://www.gob.mx/conafor/documentos/las-piceas-de-mexico>
- Yan, E., Zhou, L., Chen, H. Y. H., Wang, X., & Liu, X. (2018). Linking intraspecific trait variability and spatial patterns of subtropical trees. *Oecologia*, 186, 793-803. <https://doi.org/10.1007/s00442-017-4042-x>