

ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA ESPACIAL Y DIVERSIDAD EN ECOSISTEMAS FORESTALES

Oscar A. Aguirre Calderón¹, Javier Jiménez Pérez¹, Eduardo J. Treviño Garza¹

RESUMEN

Se presenta una metodología de análisis de la estructura espacial y diversidad de ecosistemas forestales en Durango, México, donde predominan bosques de pino y pino-encino. Bosques naturales de gran diversidad y de alto valor ecológico ocurren en algunas localidades como el valle de Santa Bárbara. Estos ecosistemas, con coníferas de distribución restringida como los géneros *Picea*, *Abies* y *Pseudotsuga*, se localizan en sitios húmedos y sombreados. En un sitio de estas características se desarrolló un procedimiento para el análisis detallado y la comparación de la estructura forestal espacial, empleando tres parcelas de muestreo de un cuarto de hectárea en las que se evaluaron la totalidad de los árboles y sus coordenadas. El objetivo del estudio fue el desarrollo de un método para la caracterización cuantitativa de la estructura espacial de las parcelas empleando nuevos parámetros de diversidad espacial, presentándolo mediante el análisis comparativo de los tres sitios evaluados. El análisis se realizó integrando un nuevo procedimiento para describir estructuras forestales complejas de una manera sencilla. Para evaluar los atributos espaciales no es necesario medir las distancias entre árboles o establecer las coordenadas de los individuos. Las características espaciales pueden establecerse básicamente en base a la evaluación de la vecindad inmediata de un número dado de árboles de referencia. Los índices describen las distribuciones de mezcla de especies, diferenciación dimensional y regularidad espacial, que pueden interpretarse fácilmente permitiendo comparaciones cuantitativas entre estructuras forestales complejas.

Palabras clave: diversidad, regularidad, diferenciación diamétrica, distribución, densidad.

ABSTRACT

Analysis of spatial forest structure and diversity of forest ecosystems

The study presents an analysis of forest spatial structure and diversity in the Federal State of Durango where the majority of the forests consist of pure pine stands or pine mixed with oak. Natural forests of greater diversity and of high ecological significance are found only in a few isolated localities in the Santa Bárbara valley. These forests, with rare conifers including the genera *Picea*, *Abies* and *Pseudotsuga* are found on particular sheltered, humid sites. For one such rare site, a detailed analysis of forest spatial structure was made, based on three one-quarter hectare plots where all the trees and their coordinates had been assessed. The objective of the study was to provide a quantitative description of the spatial structure of the plots, using new parameters of spatial diversity and to present a method for comparative analysis of the three forest sites. The analysis is using a new approach for describing complex forest structures in a straightforward manner. To evaluate the spatial attributes, it is not necessary to measure distances between trees or to establish tree coordinates. The spatial characteristics can be established merely on the basis of evaluating the immediate neighbourhood of a given number of reference trees. The variables describe the distributions of spatial mingling, size differentiation and contagion, which can be easily interpreted allowing quantitative comparisons between complex forest structures.

Keywords: mingling, contagion, diameter differentiation, distribution, forest density.

¹Facultad de Ciencias Forestales, U. A. N. L., Apartado Postal 41, 67700 Linares, N. L., México.
E-mail: oaguirre@fcf.uanl.mx

INTRODUCCIÓN

La estructura de un ecosistema se define básicamente por el tipo, número, ordenamiento espacial y ordenamiento temporal de los elementos que lo constituyen. En este contexto destacan principalmente la estructura de especies, la estructura espacial y la estructura dimensional de los ecosistemas (Aguirre, 2003).

Contar con información cuantitativa referida en tiempo y espacio sobre la estructura de los ecosistemas forestales es condición básica para el análisis de este atributo desde el punto de vista dinámico. La descripción tradicional de tales ecosistemas comprende normalmente, junto a variables medibles como área basal, diámetro y altura, una serie de variables categóricas que describen de manera cualitativa la estructura de los mismos mediante conceptos subjetivos dependientes de la persona que realiza el análisis y que, por tanto, no son reproducibles (Pommerening, 2002). Los cambios en la estructura de los ecosistemas por sucesión natural o influencias antropogénicas pueden de esta manera suponerse, pero no evaluarse cuantitativamente.

Una de las tareas del manejo forestal es la búsqueda de nuevos métodos de inventario y planeación de los ecosistemas forestales, particularmente en una época en que se generan múltiples discusiones sobre la conservación y fomento de la biodiversidad, a la par que se observa un incremento en la demanda de productos forestales. De particular importancia es la generación de esquemas de gestión de los recursos forestales en ecosistemas mixtos multicohortales, que representan los escenarios deseables a futuro en muchas regiones (Pretzsch, 2001); en tales ecosistemas deberán considerarse índices que caractericen cuantitativamente la estructura; el reto del manejo forestal consiste en obtener a partir de tales variables los nuevos indicadores de la sustentabilidad.

Los índices para la caracterización de la estructura de los ecosistemas permiten una mejor reproducción de la condición de los mismos en un momento determinado y de su evolución en el tiempo (Gadow et al., 1998). Tales índices deberán considerarse adicionalmente a las variables empleadas de manera convencional (diámetro y altura media, área basal, volumen, edad, densidad, etc.), a fin de lograr una mejor descripción de los rodales.

OBJETIVOS

El objetivo del estudio fue desarrollar y presentar un método para caracterizar y comparar la estructura espacial de ecosistemas forestales, a fin de apoyar la toma de decisiones de manejo de tales recursos con criterios de sustentabilidad y conservación de la estructura y biodiversidad.

MATERIAL DE INVESTIGACIÓN

El área del estudio se localiza en un valle alto conocido como Santa Bárbara. El sitio está ubicado a 23° 39' N y 105° 25' W, cerca de 24 km al norte del trópico del cáncer y aproximadamente a 20 kilómetros de sur de El Salto (Fig. 1). El valle de Santa Bárbara tiene una corriente permanente y está protegido contra vientos secos. Está rodeado al sur y al este por una meseta de bosques del pino, y en el lado occidental presenta una pendiente escarpada que constituye una depresión conocida como Quebrada del Infierno. En este sitio particular ocurren tres especies de coníferas *Picea chihuahuana*, *Abies durangensis* y *Pseudotsuga menziesii* dentro de un área limitada de cerca de 20 ha. Los árboles de estas especies son raros en México y en Durango, ocurriendo como relictos protegidos con un alto estado de la conservación. Especialmente significativa es la presencia de *Picea chihuahuana*. La proximidad de este rodal al trópico del cáncer proporciona un clima poco frecuente para el género *Picea*; solamente otra especie de este género ocurre en Asia en una localidad de latitud similar (Gordon, 1968).

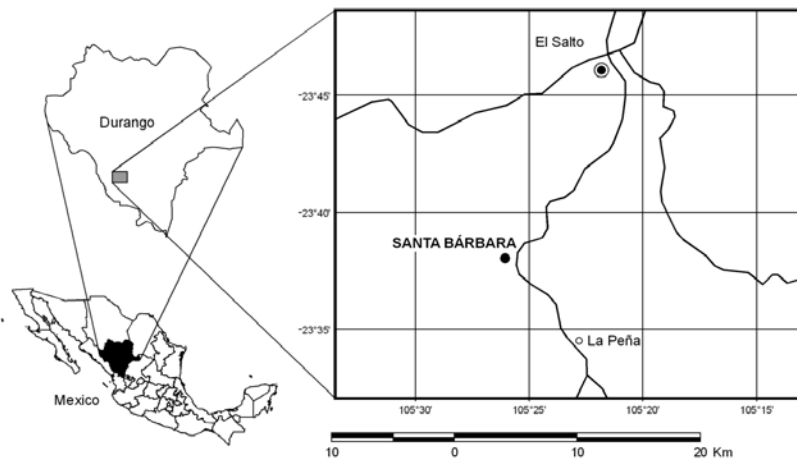


Figura 1. Localización del área de investigación.

El bosque de Santa Bárbara está relativamente libre de perturbación. En ese bosque relativamente virgen fueron establecidas tres parcelas permanentes de investigación. Cada parcela está delimitada por un cuadro de 50m x 50m y le fue asignado un número. Los tres sitios fueron establecidos a lo largo de un gradiente altitudinal en 2595, 2620 y 2685 m sobre el nivel del mar. Los datos dendrométricos de las parcelas se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Distribución espacial, número de árboles (N/ha) y área basal (G/ha) de las 13 especies arbóreas que ocurren en las parcelas de muestreo.

	Parcela 1		Parcela 2		Parcela 3	
Especie	N/ha	G/ha	N/ha	G/ha	N/ha	G/ha
<i>Picea chihuahuana</i>	24	8.15	16	2.81	40	3.67
<i>Abies durangensis</i>	92	3.32	192	14.87	20	0.68
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	68	6.98	120	6.92	80	3.15
<i>Cupressus lindleyi</i>	312	33.18	304	26.44	116	1.35
<i>Quercus rugosa</i>	4	0.20				
<i>Q. castanea</i>	40	0.14	32	1.59		
<i>Q. duriflora</i>	4	0.04			12	4.98
<i>Q. crassifolia</i>			4	0.02		
<i>Prunus serotina</i>	20	0.39				
<i>Pinus ayacahuite</i>			4	0.10	28	0.73
<i>P. durangensis</i>			4	0.27	8	1.22
<i>P. cooperi</i>					212	13.15
<i>Juniperus deppeana</i>			4	0.03	112	3.39
Total	564	52.40	680	53.05	628	32.32

METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

Descripción de la estructura espacial

La estructura de un bosque puede definirse por la distribución espacial de las posiciones de los árboles, por la mezcla espacial de las diversas especies arbóreas y por el arreglo espacial de las dimensiones de los árboles. Las diversas especies y dimensiones de los árboles pueden encontrarse muy próximos entre sí y mostrar así un alto grado de mezcla, o pueden ocurrir espacialmente segregados (Fig. 2). La estructura espacial es uno de los atributos principales de un bosque, el problema es caracterizar y describir bosques con diversas distribuciones espaciales de manera más adecuada, usando técnicas de evaluación de fácil aplicación. Las funciones de correlación L y Par, por ejemplo, son útiles para describir estructuras forestales, pero requieren bases de datos que incluyan las posiciones de los árboles (Stoyan y Stoyan, 1992, Pretzsch, 2001, Pommerening, 2002). Tales datos están escasamente disponibles en la práctica, lo que dificulta el uso de estos métodos.

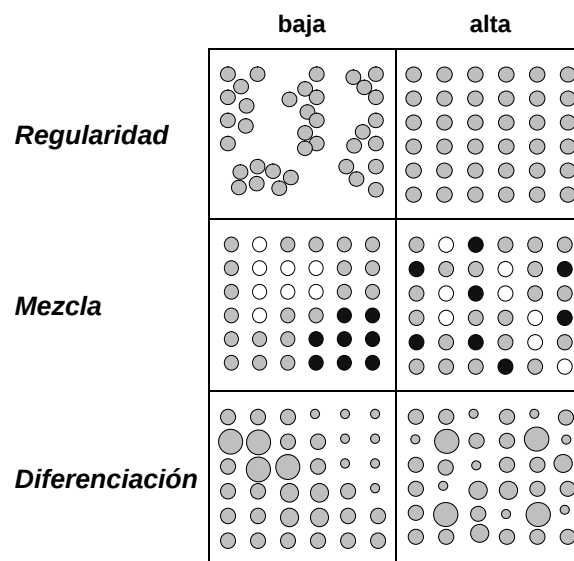


Figura 2. Los principales elementos de la estructura espacial forestal son *regularidad* de la distribución de los árboles, *mezcla* espacial de especies y *diferenciación* dimensional espacial.

Los índices de agregación, tales como el índice espacial propuesto por Clark y Evans (1954), pueden proporcionar una primera impresión general de la estructura de un bosque particular, pero no pueden ser utilizados para describir la gran variedad de arreglos espaciales (Zenner e Hibbs, 2000). Esta deficiencia es especialmente importante en bosques muy irregulares donde ocurre una alta variabilidad de las características estructurales en una escala reducida (Albert, 1999).

Por lo anterior en este trabajo se propone un sistema de tres tipos de parámetros basados en relaciones de vecindad: regularidad, mezcla y diferenciación. Los parámetros se pueden utilizar para proporcionar una descripción cuantitativa de la estructura espacial de un bosque. La evaluación y la descripción pueden basarse en un árbol o en un punto. En el procedimiento basado en un árbol se selecciona el árbol más cercano a un punto dado de la muestra se elige como árbol de referencia y las características de sus vecinos inmediatos (dimensiones, especie) y la regularidad de sus posiciones se relacionan con las de este árbol de referencia. En el procedimiento basado en un punto, las características estructurales de un grupo de árboles vecinos (variación de especies y dimensiones de los árboles; regularidad de las posiciones de los árboles) se determinan en cada punto de muestreo (Staupendahl, 2001).

En los párrafos siguientes se describen los índices aplicados para la caracterización estructural de las parcelas objeto de investigación.

Regularidad

El índice de agregación W_i describe el grado de regularidad de la distribución espacial de los cuatro árboles más cercanos a un árbol de referencia i . W_i se basa en la clasificación del de los ángulos α_j entre estos 4 vecinos. Un valor de referencia es el ángulo estándar α_0 , que se espera en una distribución puntual regular. La variable aleatoria binaria v_j se determina comparando cada α_j con el ángulo estándar α_0 . El índice se define entonces como la proporción de ángulos α_j entre los cuatro árboles vecinos que son más pequeños que el ángulo estándar α_0 :

$$W_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 v_j \quad \text{con} \quad v_j = \begin{cases} 1, & \alpha_j < \alpha_0 \\ 0, & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad \text{y} \quad 0 \leq W_i \leq 1 \quad (1)$$

$W_i=0$ indica que los árboles vecinos al árbol de la referencia están colocados de una manera regular, mientras que $W_i=1$ denota una distribución irregular o agrupada. Con 4 vecinos, hay 5 valores posibles que W_i puede asumir (0, 0.25, 0.5, 0.75, 1). El estimador para el índice de agregación de un bosque dado es $\bar{W}$, el promedio aritmético de todos los valores de W_i . Aunque el valor promedio de agregación $\bar{W}$ es absolutamente informativo para caracterizar la distribución de un sitio, a menudo es recomendable estudiar la distribución de los valores W_i , que revelan la variabilidad estructural en un bosque dado.

Mezcla de Especies

La diversidad de la mezcla de especies se ha convertido en un aspecto muy importante del manejo forestal y la conservación y existen diferentes parámetros para describirla; un ejemplo es el índice del Shannon-Weaver, utilizado en estudios ecológicos por Pielou (1977, p. 293). En este trabajo se propone evaluar la diversidad de las especies en la vecindad de un árbol de la referencia definiendo la mezcla como la proporción de los vecinos más cercanos de n que no pertenecen a la misma especie que el árbol de la referencia (Füldner, 1995), específicamente:

$$M_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 v_j \quad (2)$$

$$\text{con} \quad v_j = \begin{cases} 1, & \text{el vecino } j \text{ pertenece a la misma especie del árbol de referencia } i \\ 0, & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad \text{y} \quad 0 \leq M_i \leq 1$$

Con cuatro vecinos, el atributo M_i de mezcla de especies puede asumir cinco valores (0.0.25, 0.5, 0.75, 1). De interés particular es la condición de mezcla que presenta cada una de las especies.

Diferenciación Dimensional

El atributo arbóreo dominancia fue propuesto por Hui *et al.* (1998) para describir la dominancia relativa de una especie dada con respecto a sus vecinos próximos. La dominancia se define como la proporción de los n vecinos próximos de un árbol de referencia dado que son más pequeños que tal árbol de referencia, y se calcula de la misma manera que los parámetros estructurales previamente descritos:

$$U_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 v_j \quad (3)$$

$$\text{con } v_j = \begin{cases} 1, & \text{vecino } j \text{ es más pequeño que el árbol de referencia } i \\ 0, & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad \text{y } 0 \leq U_i \leq 1$$

Con cuatro vecinos, U_i puede asumir los valores 0, 0.25, 0.5, 0.75 y 1.

Cuantificación de diferencias entre poblaciones

Uno de los objetivos de caracterizar poblaciones de árboles en forma más adecuada es poder compararlas entre sí. Se requieren comparaciones, por ejemplo, cuando se desea evaluar la diferencia entre dos bosques naturales que ocurren en el mismo sitio, o entre bosques manejados y sin manejo. Para este propósito, se desarrolló la variable *discrepancia absoluta* que mide el monto de un atributo particular de la población A que necesita ser intercambiada entre las dos poblaciones para hacerla idéntica a la población B. Por ejemplo, la discrepancia del número de árboles entre las parcelas 1 y 2 es igual a $(680-564)/2=58$ árboles que tendrían que ser intercambiados de manera que ambas parcelas tuvieran el mismo número de árboles (compare Tabla 1). Las discrepancias en área basal correspondientes son para parcela 1-parcela 2 0,32; para parcela 1-parcela 3 10,04 y para parcela 2-parcela 3 10,36. Este es un concepto útil que se puede ampliar para incluir las distribuciones diamétricas y las distribuciones de la agregación de las tres poblaciones estudiadas (Gregorius, 1974; Pommerening, 2002).

Discrepancia de las Distribuciones Diamétricas

La discrepancia absoluta de las distribuciones diamétricas se define como sigue:

$$rDD = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^n |D_{1i} - D_{2i}|$$

con D_{1i} = frecuencia relativa de la i -ésima clase diamétrica en la población 1

D_{2i} = frecuencia relativa de la i -ésima clase diamétrica en la población 2

n = número de clases diamétricas

rDD representa la proporción relativa que se debe intercambiar entre las clases si la distribución empírica 1 se transforma en la distribución 2. Correspondientemente, $1-rDD$ es la proporción común a ambas distribuciones. Un valor de $rDD = 1$ significa que ambas distribuciones no tienen ninguna clase común, mientras que $rDD = 0$ significa que las distribuciones son absolutamente idénticas.

Discrepancia Relativa de las Distribuciones de Agregación

Se pueden comparar las diferencias en el arreglo espacial de los árboles en una manera similar, usando las discrepancias relativas de las distribuciones de agregación rDW :

$$rDW = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^n |W_{1i} - W_{2i}|.$$

con D_{1i} = frecuencia relativa de la i -ésima clase de agregación en la población 1
 D_{2i} = frecuencia relativa de la i -ésima clase de agregación en la población 2
 n = número de clases de agregación

RESULTADOS

Descripción de la estructura espacial forestal

Regularidad

En la figura 3 se presentan los gráficos de las distribuciones de agregación en las parcelas investigadas, observándose que se diferencian con respecto a sus medias y varianzas. Los valores medios de agregación son 0.504, 0.528 y 0.515 en las parcelas 1, 2 y 3, respectivamente. De acuerdo con el trabajo de Hui y Gadow (2002), las tres distribuciones espaciales se pueden caracterizar como aleatorias. La parcela 2 es la más cercana a una distribución agrupada. El índice de agregación muestra también grupos en cerca de 20% de los casos.

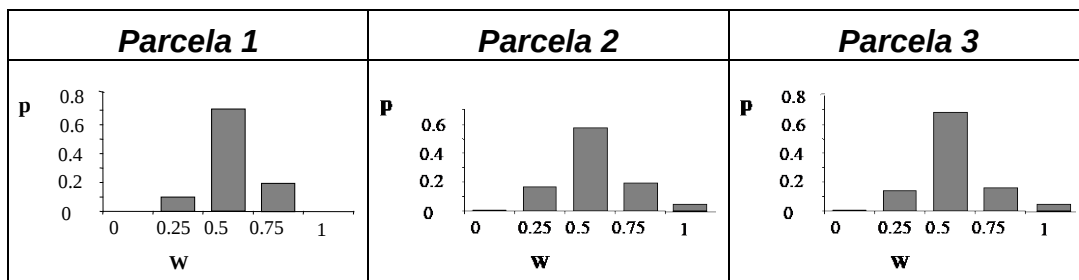


Figura 3. Distribuciones de la variable agregación en las tres parcelas de muestreo.

Mezcla de Especies

La Figura 4 presenta los gráficos resultantes del análisis de la distribución de mezcla de especies para *Picea chihuahuana*, *Abies durangensis* y *Cupressus lindleyi* en la parcela 1.

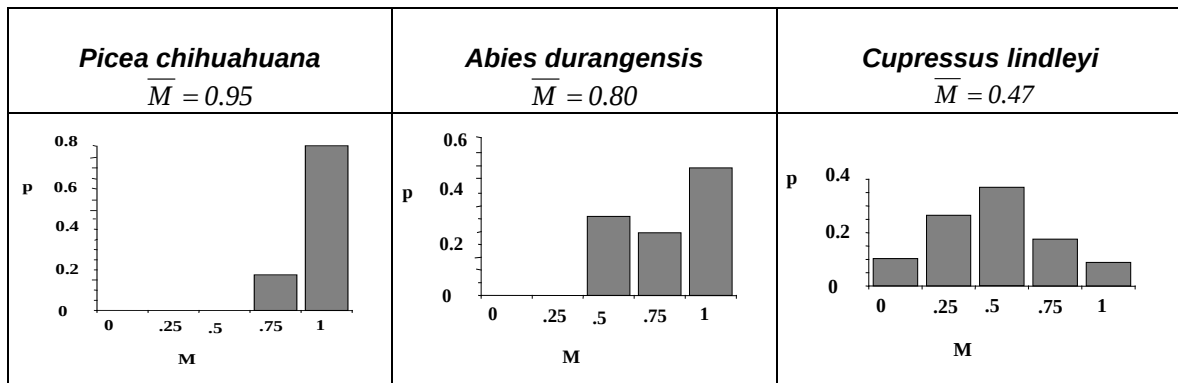


Figura 4. Distribuciones de la mezcla de especies para tres especies arbóreas en la parcela 1.

La distribución de la mezcla de *Picea chihuahuana* muestra que la especie ocurre rodeada por 3 o 4 vecinos que pertenecen a una especie distinta. En contraste, *Cupressus lindleyi* se presenta en una variedad de constelaciones de mezclas: en grupos puros (cerca de 10%), en grupos donde la mitad de los árboles son *Cupressus lindleyi* (cerca de 35%) y en grupos donde ningunos de los vecinos es *Cupressus lindleyi* (cerca de 10%). *Abies durangensis* no forma grupos puros o casi puros, sino que ocurre con mayor frecuencia como árbol aislado entre las otras especies.

Diferenciación Dimensional

En la figura 5 se presentan los gráficos de la distribución del índice de dominancia para las especies *Cupressus lindleyi*, *Abies durangensis* y *Pseudotsuga menziesii* en la parcela 1.

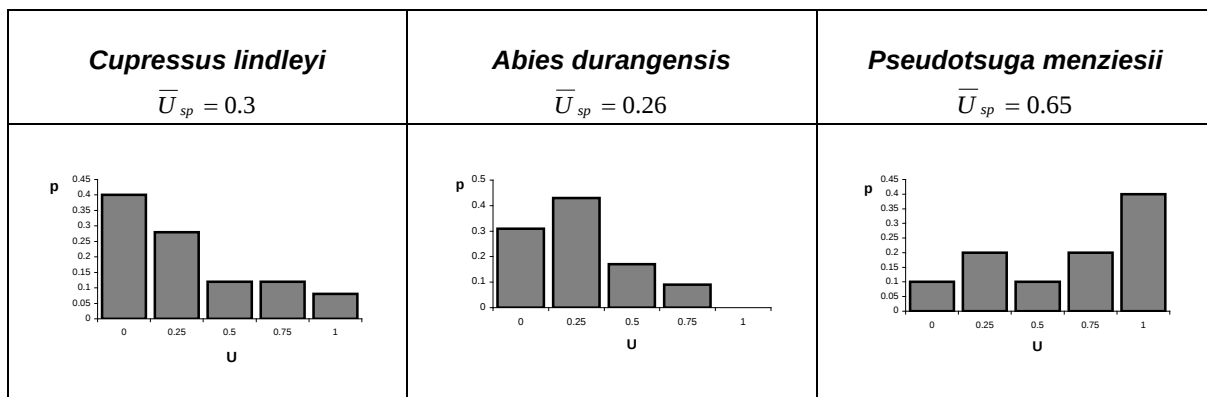


Figura 5. Distribuciones de la variable dominancia para tres especies arbóreas en la parcela 1. $\bar{U}_{sp}$ = dominancia promedio para una especie dada.

El criterio de dominancia es útil si se desea describir esta característica relativa para una especie arbórea particular. La distribución de *Cupressus lindleyi* presenta un sesgo a la izquierda, que demuestra que solamente algunos árboles de referencia son dominantes en su vecindad inmediata mientras que la mayoría están rodeados de por lo menos tres vecinos más grandes. Una interpretación similar se puede presentar para *Abies durangensis*, mientras que *Pseudotsuga menziesii* es una especie más dominante. Las tres especies ocurren como los árboles dominantes, codominantes y suprimidos en la parcela 1. Estos análisis fueron hechos para todas las especies arbóreas en cada una de las tres parcelas.

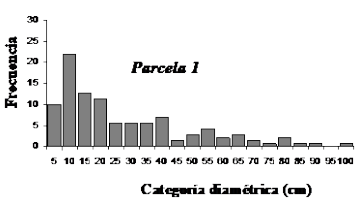
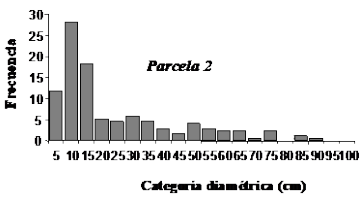
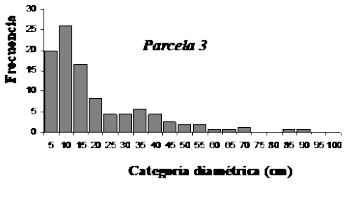
Cuantificación de diferencias entre poblaciones

Discrepancia de las Distribuciones Diamétricas

Los resultados de la investigación de las diferencias estructurales, en lo referente a distribución diamétrica entre las parcelas evaluadas se presentan en la Tabla 2.

Las diferencias entre las distribuciones diamétricas son relativamente pequeñas cuando se comparan las parcelas 2 y 3 y mucho mayores cuando la parcela 1 se compara con una de las otras dos. En la parcela 1 ocurren más árboles de grandes dimensiones y menos individuos de dimensiones pequeñas. Las parcelas 2 y 3 tienen una población relativamente grande de árboles pequeños.

Tabla 2. Histogramas de las distribuciones diamétricas de las parcelas y las discrepancias entre ellas.

		<i>Parcela 2</i>	<i>Parcela 3</i>
 <i>Parcela 1</i>	<i>Parcela 1</i>	0.20	0.17
 <i>Parcela 2</i>	<i>Parcela 2</i>		0.09
 <i>Parcela 3</i>	<i>Parcela 3</i>		

Discrepancia Relativa de las Distribuciones de Agregación

Los resultados de la discrepancia relativa de las distribuciones de la agregación se presentan en la Tabla 3. La discrepancia absoluta mide el monto de la diferencia, pero no el sentido. El sentido se establece fácilmente comparando las medias de la distribución. En el caso de la agregación, los valores medios están todos dentro del rango de una distribución aleatoria, encontrada por Hui y Gadow (2002). La distribución de la parcela 2 está muy cerca de ser clasificada como agrupada.

Tabla 3. Valores medios de agregación y las discrepancias de sus distribuciones.

Agregación promedio $\bar{W}$	Parcela	2	3
0.504	1	0.15	0.08
0.528	2		0.10
0.515	3		

DISCUSIÓN

El análisis presentado en este trabajo evalúa la densidad, la diversidad de las especies y la estructura espacial empleando procedimientos tradicionales y nuevos. El procedimiento tradicional incluye comparaciones de área basal y número de árboles por ha como medida de densidad. Con áreas basales de más de 50 m²/ha, las parcelas 1 y 2 presentan densidades muy altas en comparación con la parcela 3 (32 m²/ha). Los niveles de biomasa de las parcelas 1 y 2 son altos en ambos casos, pero sus números de árboles se diferencian considerablemente. La parcela 2 tiene 20% más árboles y esta diferencia se refleja claramente en la distribución diamétrica, que es otra medida tradicional de la estructura forestal.

Los atributos espaciales proporcionan información adicional sobre las parcelas de muestreo. La agregación basada en un árbol W_i puede emplearse para caracterizar la distribución espacial de las posiciones de los árboles sin necesidad de medir las distancias entre los mismos. Describe el grado de regularidad de la distribución espacial de los cuatro árboles más cercanos a un árbol de referencia i basado en la clasificación de los ángulos α_j entre los árboles vecinos. La dominancia mide la proporción de los n vecinos más cercanos a un árbol de referencia dado que son más pequeños que éste, y proporciona información sobre el estado relativo de una especie dentro de la población. La diversidad de la especie es evaluada por el atributo mezcla de especies que mide la proporción de los n vecinos más cercanos que no pertenecen a la misma especie del árbol de referencia.

En ocasiones se requiere realizar una comparación entre diversas poblaciones arbóreas, por ejemplo entre bosques manejados y sin manejo. La discrepancia absoluta mide la dimensión de la diferencia entre distribuciones, y es una variable útil que permite la interpretación sencilla de diferencias en las distribuciones de clases dimensionales, de valores de mezcla de especies y de los valores de agregación. El sentido de las diferencias se establece fácilmente comparando los valores medios de la distribución. Con respecto a la agregación, los valores medios en las tres parcelas están todos dentro de la gama de una distribución aleatoria, aunque la distribución de la parcela 2 está muy cerca de ser clasificada como agrupada.

CONCLUSIONES

Tomando como ejemplo este bosque con especies arbóreas de escasa distribución, el análisis cuantitativo se ha realizado utilizando un nuevo procedimiento para describir estructuras forestales complejas de una manera sencilla. Para evaluar los atributos espaciales, no es necesario medir distancias entre los árboles o establecer las coordenadas de los árboles. Las características espaciales se han establecido simplemente a partir de la evaluación de los vecinos inmediatos de un número dado de árboles de la referencia y pueden ser interpretadas fácilmente. El sistema para describir y comparar la estructura espacial del bosque presentado en este trabajo es a) más integral que los procedimientos tradicionales (incluye especies, dimensiones y patrones de distribución simultáneamente), mientras que los métodos clásicos se limitan generalmente a describir patrones puntuales y b) más fácilmente realizable en campo, ya que los métodos clásicos requieren la medición costosa de las posiciones de los árboles y por la enumeración completa de las parcelas de muestreo.

RECONOCIMIENTO

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), Proyecto 41181-Z; al Programa de Apoyo a la Investigación Científica y Tecnológica (PAICYT), Proyecto CN914-05.

REFERENCIAS

Aguirre C., O. A. 2002: Índices para la caracterización de la estructura de ecosistemas forestales. *Ciencia Forestal en México*. 27 (92): 5-28.

Albert, M., 1999: Analyse der eingriffsbedingten Strukturveränderung und Durchforstungsmodellierung in Mischbeständen. PhD Diss., Faculty of Forest Sciences, Univ. Göttingen, Germany. Hainholz Verlag, p. 63-68.

Clark, P. J., Evans, F. C., 1954: Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationships in populations. *Ecology*, 35: 445 – 453.

Földner, K., 1995: Strukturbeschreibung von Buchen-Edellaubholz-Mischwäldern. Dissertation, Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie, Georg-August-University Göttingen. Cuvillier, Göttingen. 146 p.

Gadow, K. v., Hui, G.Y., Albert, M., 1998: Das Winkelmaß - ein Strukturparameter zur Beschreibung der Individualverteilung in Waldbeständen. *Centralblatt für das gesamte Forstwesen*. 115(1):1 – 9.

Gordon, A. G. 1968: Ecology of *Picea chihuahuana* Martinez. *Ecology* 49 (5): 880-896.

Graz, P., 2002: The behaviour of the Species Mingling Index *Msp* in relation to species dispersal. Unpublished manuscript.

Gregorius, H.-R., 1974: Genetischer Abstand zwischen Populationen - Zur Konzeption der genetischen Abstandsmessung. *Silvae Genetica* 23: 22-27.

Hui, G.Y., Albert, M., Gadow, K. v., 1998: Das Umgebungsmaß als Parameter zur Nachbildung von bestandesstrukturen. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 117(1): 258-266.

Hui, G. H. and Hu Y. B. 2001: Measuring species spatial segregation in mixed forest. *Forest Research*. 14(1):23-27.

Hui, G. Y., Gadow K. v., 2002: Das Winkelmaß - Theoretische Überlegungen zum optimalen Standardwinkel. *Allgemeine Forst u. Jagdzeitung*. En prensa.

Pielou, E. C. 1977: *Mathematical Ecology*. John Wiley & Sons, New York: 384 p.

Pommerening, A., 2002: Approaches to quantifying forest structures. *Forestry*. 75(3): 305-324.

Pretzsch, H., 2001: *Modellierung des Waldwachstums*. Parey Buchverlag Berlin. 341 p.

Staupendahl, K., 2001: Das flächenbezogene Winkelmaß W_f – Ein Index zur quantitativen Beschreibung der horizontalen Baumverteilung. In: A. Akca et al.(Ed.): *Waldinventur, Waldwachstum und Forstplanung - Moderne Technologien, Methoden und Verfahrensweisen*. Festschrift K. von Gadow. Zohab-Verlag Göttingen. 101 – 115.

Stoyan, D. u. Stoyan, H., 1992: *Fraktale Formen Punktfelder. Methoden der Geometrie-Statistik*. Akademie-Verlag, Berlin. 394 p.

Zenner, E. K., Hibbs, D. E., 2000: A new method for modeling the heterogeneity of forest structure. *Forest Ecology and Management*. 129(1): 75-87.