

Comparación de métodos de muestreo para caracterizar bosques de pino-encino en el norte de México

Comparison of sampling methods to characterize pine-oak forests in northern México

Viridiana Sugey Galván-Moreno¹ , Oscar Alberto Aguirre-Calderón^{1*} , Eduardo Alanís-Rodríguez¹ , Javier Jiménez-Pérez¹ , Luis Gerardo Cuéllar-Rodríguez¹ , Gerónimo Quiñones-Barraza² , Joel Rascón-Solano³ 

¹Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales, Programa de Doctorado en Ciencias con Orientación en Manejo de Recursos Naturales. Carretera Nacional Km 145, CP. 67700. Linares, Nuevo León, México.

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agropecuarias, Campo Experimental Valle del Guadiana (INIFAP-CEVAG), Km 4.5 Carretera Durango-Mezquital, CP. (34170). Durango, Durango, México.

³Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales, 2.5 km carretera Delicias-Rosales, CP. 33000. Delicias, Chihuahua, México.

*Autor de correspondencia: oscar.aguirrecl@uanl.edu.mx

Artículo científico

Recibido: 02 de junio 2025

Aceptado: 09 de noviembre 2025

RESUMEN. Este estudio presenta una evaluación comparativa de metodologías de muestreo forestal para describir la estructura y composición de bosques irregulares de pino-encino en el Ejido Aboreachi, Chihuahua, al norte de México. Se analizó una superficie de 11.44 hectáreas mediante un censo total y se compararon 16 métodos de muestreo dasométrico, incluyendo parcelas de dimensión fija y parcelas concéntricas de tamaños progresivos (100–1 500 m²). La evaluación consideró variables estructurales clave como la distribución diamétrica, riqueza específica, diversidad alfa y equidad, utilizando índices ecológicos (Margalef, Shannon-Wiener, Simpson, Hill, Pielou) y el Índice de Valor de Importancia (IVI). Los resultados indican que las parcelas concéntricas de mayor superficie (≥ 900 m²) ofrecen estimaciones significativamente más cercanas a los valores censales, representando de manera más precisa la heterogeneidad estructural, la diversidad específica y la dominancia de especies. En contraste, las unidades de menor tamaño y la parcela rectangular (50 × 20 m) mostraron limitaciones marcadas, subestimando la riqueza y diversidad, y presentando mayor variabilidad en las estimaciones. La equidad entre especies, sin embargo, se mantuvo estable entre métodos, lo que sugiere una robustez estructural frente al diseño de muestreo. Se concluye que el tamaño y la forma de la unidad de muestreo influyen significativamente en la precisión de la caracterización ecológica de bosques irregulares. Para estudios de manejo sostenible y conservación, se recomienda el uso de parcelas circulares de al menos 900 m², debido a su mayor capacidad para capturar la complejidad estructural y composicional de estos ecosistemas.

Palabras clave: Diversidad de especies, estructura forestal, inventario forestal, índices ecológicos, parcelas concéntricas.

ABSTRACT. This study presents a comparative evaluation of forest sampling methodologies aimed at describing the structure and composition of irregular pine-oak forests in Ejido Aboreachi, Chihuahua, northern Mexico. A total area of 11.44 hectares was analyzed through a complete tree census, and 16 forest inventory methods were compared, including fixed-area plots and concentric plots of increasing sizes (100–1 500 m²). Key structural variables were assessed, including diameter distribution, species richness, alpha diversity, and evenness, using ecological indices such as Margalef, Shannon-Wiener, Simpson, Hill numbers, Pielou's evenness, and the Importance Value Index (IVI). Results indicate that larger concentric plots (≥ 900 m²) provide significantly more accurate estimations relative to the census, capturing forest structural heterogeneity, species diversity, and ecological dominance more effectively. In contrast, smaller plots and the 50 × 20 m rectangular plot showed clear limitations, systematically underestimating richness and diversity, and yielding higher variability in estimates. However, species evenness remained consistent across sampling methods, suggesting structural robustness to plot design. It is concluded that plot size and shape have a decisive influence on the accuracy of ecological characterization in irregular forest stands. For high-precision studies focused on sustainable forest management and conservation, circular plots of at least 900 m² are recommended due to their superior capacity to reflect the structural and compositional complexity of these ecosystems.

Keywords: Species diversity, forest structure, forest inventory, ecological indices, concentric plots.

Como citar: Galván-Moreno VS, Aguirre-Calderón OA, Alanís-Rodríguez E, Jiménez-Pérez J, Cuéllar-Rodríguez LG, Quiñones-Barraza G, Rascón-Solano J (2025) Comparación de métodos de muestreo para caracterizar bosques de pino-encino en el norte de México. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios Núm. Esp. V: e4642. DOI: [10.19136/era.a12nV.4642](https://doi.org/10.19136/era.a12nV.4642).

INTRODUCCIÓN

Los bosques naturales de pino-encino en el norte de México representan un ecosistema forestal complejo y diverso, caracterizado por una estructura heterogénea y una composición de especies variadas. Estos bosques desempeñan un papel crucial en la regulación del clima, la conservación del agua y la provisión de hábitats para diversas especies de flora y fauna (Rzedowski 2017). Además de su valor ecológico, la conservación de estos ecosistemas es esencial para la estabilidad ambiental de la región. La comprensión precisa de su estructura y composición es fundamental para el manejo forestal sostenible y la conservación de estos bosques (González-Espinosa *et al.* 2020a).

La evolución de las metodologías para describir y evaluar la estructura y composición de bosques ha sido significativa en las últimas décadas. Tradicionalmente, los inventarios forestales basados en mediciones directas han sido ampliamente utilizados para obtener datos sobre la biodiversidad y la distribución de especies. Sin embargo, estos métodos pueden ser limitados en su capacidad para capturar la complejidad de bosques irregulares, como los de pino-encino, debido a su alta heterogeneidad espacial (Hubbell *et al.* 2018). Con los avances en tecnologías de teledetección y modelado espacial, han surgido nuevas metodologías que permiten una evaluación más detallada y precisa de estos sistemas forestales (Brown *et al.* 2019a, Martínez *et al.* 2021). La integración de estas tecnologías con enfoques tradicionales está mejorando la capacidad de los investigadores para obtener información más precisa sobre la estructura y dinámica de los bosques, especialmente en áreas de difícil acceso o con complejidades ecológicas particulares.

A pesar de estos avances, la eficacia y aplicabilidad de las metodologías para bosques específicos, como los de pino-encino en el norte de México, aún no se han evaluado exhaustivamente. La comparación de metodologías para describir la estructura y composición de estos bosques puede proporcionar información valiosa para la selección de técnicas más adecuadas y eficientes en contextos ecológicos específicos ((Hubbell y Foster 2020). La utilización de parcelas concéntricas, que se han demostrado efectivas en la evaluación de la diversidad de especies y la estructura de ecosistemas tropicales (Zhang *et al.* 2021), puede ser particularmente útil en estos ecosistemas irregulares. Estos enfoques permiten captar variaciones en la biodiversidad a través de distintas intensidades de muestreo y son eficaces para monitorear tanto la biodiversidad como las dinámicas de regeneración y crecimiento (López-Barrera *et al.* 2018).

Por otro lado, los índices ecológicos como el de Shannon-Wiener o el índice de Simpson son herramientas esenciales para evaluar la diversidad y equidad de especies dentro de un ecosistema, y pueden proporcionar una comprensión más profunda de la biodiversidad y la estabilidad de los bosques (López-Barrera *et al.* 2018). Estos índices son particularmente relevantes en bosques irregulares, donde las distribuciones espaciales de las especies pueden ser altamente dispares (Phillips *et al.* 2019). Debido a lo anterior, este estudio tiene como objetivo realizar una evaluación comparativa de las técnicas de muestreo más empleadas para describir la estructura y composición de los bosques de pino-encino en el norte de México. Se examinarán enfoques de muestreo con parcelas de dimensión fija y variable, evaluando sus ventajas, limitaciones y aplicabilidad en el contexto de estos ecosistemas forestales específicos. Este análisis comparativo contribuirá a la

conservación efectiva de los bosques y a la optimización de las metodologías para la evaluación de ecosistemas forestales complejos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del área de estudio

Este estudio se llevó a cabo en el Ejido Aboreachi, ubicado en el municipio de Guachochi, Chihuahua. La investigación se centró en una Parcela Permanente de Investigación Forestal, que corresponde a un área de bosque de pino-encino con una superficie de 11.44 hectáreas, la cual fue censada en el año 2018 y presenta una condición irregular (Figura 1).

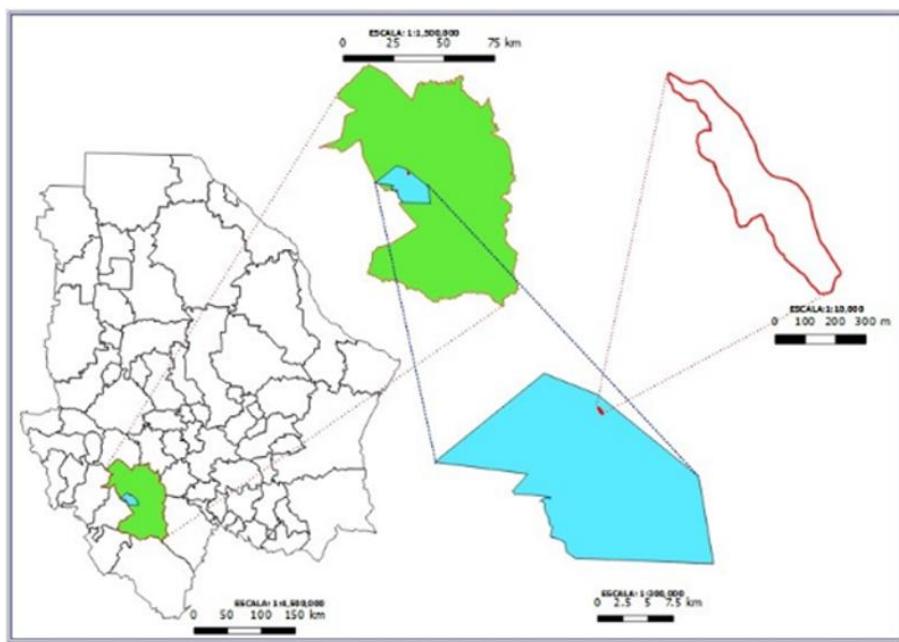


Figura 1. Localización del área de estudio

Materiales y equipos utilizados

Para el estudio, se recopilaron datos dasométricos de cada individuo con un diámetro normal (DN1.30) \geq a 7.6 cm. El diámetro de los árboles se midió utilizando una cinta diamétrica forestal de la marca Forestry Suppliers, mientras que la altura total se determinó con un hipsómetro. La estimación del área basal en sitios de dimensiones variables se realizó con un relascópico de Bitterlich. Las mediciones de azimut y distancia se llevaron a cabo con una brújula forestal DQL12Z South Geo Systems y una cinta métrica de fibra de vidrio de 100 metros, marca Truper.

El análisis consistió en contrastar los resultados derivados de 16 métodos de muestreo dasométrico respecto al censo del área de estudio. Los métodos evaluados incluyeron una parcela de dimensión fija de 50×20 metros y 15 parcelas concéntricas de tamaño progresivo, con áreas que variaron de 100 a 1500 metros cuadrados. Se emplearon 10 parcelas por método. Cada parcela fue diseñada para capturar distintas escalas de variabilidad estructural del bosque irregular de pino-encino.

Frecuencia diamétrica

Se realizó una caracterización de la estructura diamétrica del censo y de los diferentes métodos de muestreo, con la finalidad de analizar si los métodos de muestreo recaban información desigual respecto al censo.

Curvas de acumulación de especies

Con el objetivo de evaluar la suficiencia del esfuerzo de muestreo, se construyeron curvas de acumulación de especies. Esta técnica consistió en graficar el número acumulado de especies en función del número progresivo de parcelas o individuos evaluados. Una asíntota en la curva indicará que se ha capturado adecuadamente la diversidad de especies presentes en el área de estudio. Este procedimiento permitirá garantizar la representatividad de los datos colectados (Colwell 2001).

Índice de riqueza de especies

La riqueza de especies será determinada mediante el conteo directo del número total de especies presentes en el área de estudio. Este indicador simple proporciona una medida básica de la diversidad biológica, siendo útil como referencia para los índices más complejos de diversidad.

Índice de Margalef

La riqueza específica será cuantificada mediante el índice de Margalef (Dmg), el cual relaciona el número total de especies (S) con el número total de individuos (N), corregido a través de la función logarítmica natural. Este índice proporciona una medida de riqueza relativa, estandarizada respecto al tamaño de la muestra, permitiendo comparaciones válidas entre distintas áreas o metodologías (Margalef 1972).

Índice de Pielou

Para evaluar la equitatividad en la distribución de los individuos entre las especies registradas, se calculará el índice de Pielou (J'). Este índice se deriva del cociente entre el índice de Shannon (H') y el logaritmo natural del número total de especies (S). Valores de J' próximos a la unidad indicarán una distribución equitativa de abundancias, mientras que valores cercanos a cero reflejarán una dominancia marcada de pocas especies.

Índice de Shannon-Wiener

La diversidad alfa será evaluada a través del índice de Shannon-Wiener (H'), el cual integra tanto la riqueza como la equidad de las especies. El valor obtenido permite inferir la heterogeneidad estructural del bosque, siendo mayor en comunidades más diversas y equitativas (Shannon 1948).

Índices de Hill

Se calcularán los números de Hill N1 y N2 para estimar la diversidad efectiva, los cuales transforman índices clásicos en números de especies equivalentes. Estos índices permiten una interpretación más intuitiva de la diversidad, expresada como el número de especies "abundantes" (N1) y "dominantes" (N2) en la comunidad.

Índice de Simpson

La dominancia en la comunidad será evaluada mediante el índice de Simpson (D). También se calculará la diversidad de Simpson (1-D) para expresar la probabilidad de que dos individuos seleccionados aleatoriamente pertenezcan a especies distintas. Este índice es especialmente sensible a las especies dominantes.

Índice de Valor de Importancia (IVI)

Finalmente, se calculará el Índice de Valor de Importancia (IVI) para cada especie, combinando su frecuencia relativa, densidad relativa y dominancia relativa. Este índice permite identificar las especies ecológicamente más relevantes dentro de la comunidad, integrando su presencia, abundancia e incluso biomasa relativa en el ecosistema.

Análisis de la información

El estudio se llevó a cabo utilizando el paquete estadístico InfoStat, versión 2020. Esta herramienta permitió realizar los análisis estadísticos necesarios para comparar las estimaciones obtenidas mediante diferentes métodos de muestreo con los valores reales registrados en el censo del arbolado comercial. Con el propósito de asegurar la validez de las inferencias estadísticas, en primer lugar, se aplicó una prueba de normalidad de Shapiro-Wilk a los datos correspondientes a cada índice o variable analizada. Este procedimiento permitió verificar el cumplimiento de los supuestos básicos para el análisis paramétrico posterior.

Se realizó un Análisis de Varianza (ANOVA) de un factor, cuyo objetivo fue detectar diferencias estadísticamente significativas entre los métodos de muestreo en términos de su precisión al estimar los valores censales. En los casos en los que el ANOVA indicó diferencias significativas ($p \leq 0.05$), se procedió a realizar una prueba de separación de medias de Tukey (HSD), con la finalidad de identificar específicamente qué métodos presentaban diferencias sustanciales entre sí. El análisis se enfocó en determinar cuál de los métodos de muestreo evaluados ofrecía la estimación más precisa respecto a los valores reales del censo, considerando tanto la estructura como la composición de las masas forestales.

RESULTADOS

Frecuencia diamétrica

La Figura 2a, correspondiente al censo, muestra una típica distribución en forma de "J" invertida, caracterizada por un alto número de individuos en las clases diamétricas menores (10-20 cm) y una disminución progresiva hacia clases de mayor diámetro. Este patrón es característico de bosques irregulares, en donde coexisten múltiples cohortes de regeneración y árboles maduros dispersos. Mientras que la Figura 2b, que representa la parcela rectangular de 20 × 50 metros, muestra una distribución que también sugiere un patrón de regeneración activa; sin embargo, presenta mayor variabilidad y menor suavidad en la progresión de clases, indicando un menor poder de captación de la estructura completa del bosque.

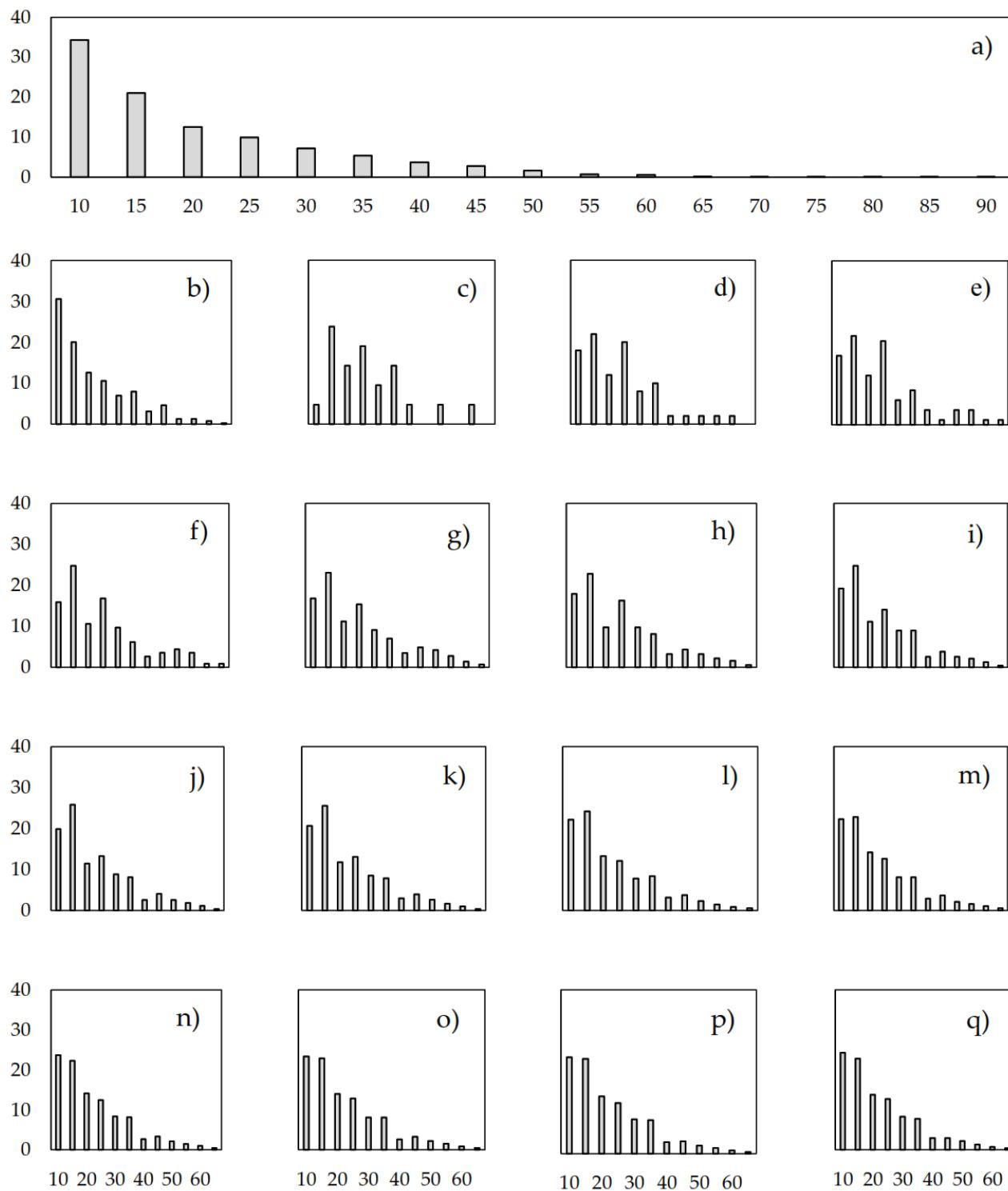


Figura 2. Frecuencia de categorías diamétrica por cada método de muestreo. a) Censo, b) Rectangular, c) 100 m², d) 200 m², e) 300 m², f) 400 m², g) 500 m², h) 600 m², i) 700 m², j) 800 m², k) 900 m², l) 1 000 m², m) 1,100 m², n) 1 200 m², o) 1 300 m², p) 1 400 m², q) 1 500 m².

Las Figuras 2c a 2q, correspondientes a las parcelas concéntricas de 100 a 1500 m², exhiben distribuciones que, en general, mantienen la tendencia de alta frecuencia en las clases diamétricas

menores, aunque presentan variaciones en la captura de individuos en clases intermedias y mayores. A medida que el área de muestreo aumenta, las distribuciones tienden a asemejarse más al patrón observado en el censo, reduciendo la dispersión y mejorando la representación de las clases de mayor diámetro. No obstante, en las parcelas de menor tamaño (Figura 2c a 2e), se observa una mayor fragmentación en la distribución de clases diamétricas, subestimando especialmente los individuos de diámetros mayores a 40 cm. En contraste, las parcelas de mayor superficie (Figura 2n a 2q) reflejan una representación más cercana al comportamiento poblacional observado en el censo, aunque con ligeras subestimaciones en las clases superiores.

Curvas de acumulación de especies

La curva de acumulación de especies evidencia que el censo del arbolado comercial alcanza una estabilización en el número de especies registradas, indicando un esfuerzo de muestreo adecuado para describir la riqueza del sitio. Las parcelas concéntricas, de dimensiones entre 100 y 1 500 m², replican en general la tendencia del censo, aunque tienden a subestimar ligeramente el número total de especies, particularmente en unidades de menor área (Figura 3).

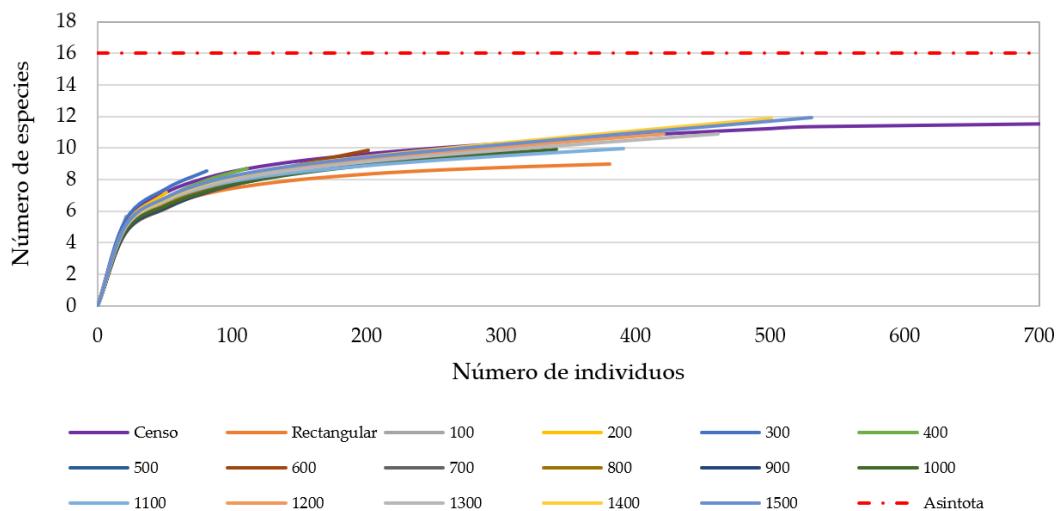


Figura 3. Curva de acumulación de especies por método de análisis

Se observa que las parcelas de tamaño intermedio (800 a 1 200 m²) presentan una mayor aproximación a los valores del censo, mientras que la parcela rectangular de 50 × 20 metros muestra una captación inferior de la diversidad específica. Sin embargo, al ser una superficie finita bajo análisis, no se sugiere que el tamaño y diseño de la unidad de muestreo influyan de manera significativa en la capacidad de representar la riqueza de especies en bosques irregulares. Ninguno de los métodos alcanzó la asymptota teórica establecida en 16 especies, lo que indica la posible omisión de especies raras o de baja frecuencia.

Riqueza de especies

El análisis estadístico muestra diferencias altamente significativas entre métodos ($F = 14.34$, $p < 0.0001$). Los resultados muestran que el censo registró el valor más alto de riqueza de especies (16 especies), siendo estadísticamente superior a todos los métodos de muestreo evaluados. Las

parcelas concéntricas de mayores superficies ($\geq 1\,100\,m^2$) tienden a registrar valores más cercanos al censo (siete especies), indicando menor subestimación de la riqueza específica. En contraste, las parcelas de menor tamaño ($100\text{--}500\,m^2$) y la parcela rectangular presentan una subestimación significativa de la riqueza de especies (Figura 4).

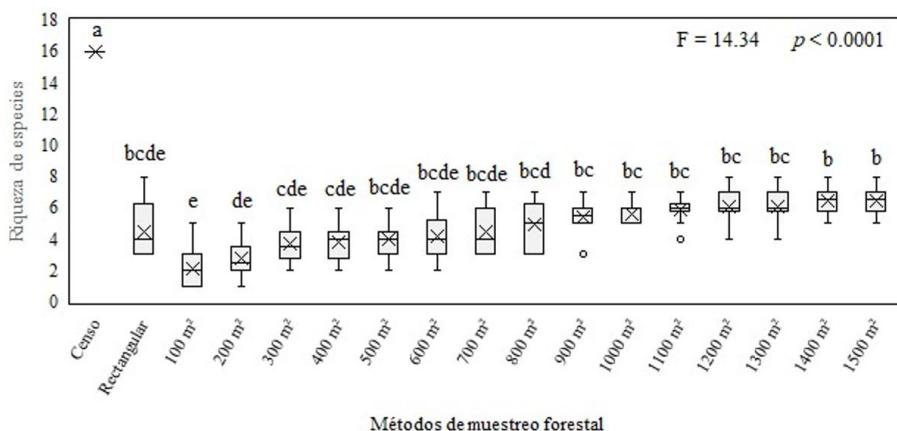


Figura 4. Contraste de métodos de muestreo en relación a la riqueza de especies.

Estos resultados indican que el tamaño de la unidad de muestreo influye considerablemente en la captura de la riqueza específica en bosques irregulares, siendo necesario utilizar parcelas de superficie amplia para obtener estimaciones más representativas.

Índice de Margalef

El análisis estadístico presenta diferencias estadísticamente significativas entre métodos ($F = 2.62$, $p = 0.0013$). El análisis de la Figura 5 revela que el valor del índice de Margalef obtenido en el censo es significativamente mayor que el valor registrado mediante el método de la parcela rectangular, indicando que este último subestima la riqueza específica. Las parcelas concéntricas de distintas áreas no difieren estadísticamente del censo en la mayoría de los casos, aunque tienden a presentar valores ligeramente inferiores, como reflejo de una menor captación de especies.

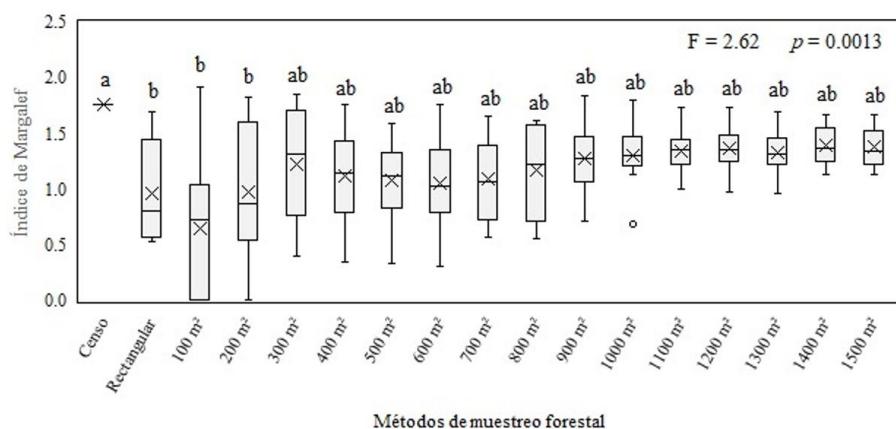


Figura 5. Contraste de métodos de muestreo en relación al Índice de Margalef.

Los métodos marcados con la letra "b" muestran una tendencia a subestimar la riqueza en comparación al censo (letra "a"), mientras que los métodos marcados con "ab" no presentan diferencias significativas con respecto al censo. Estos resultados confirman que, aunque las parcelas concéntricas tienden a acercarse al comportamiento del censo, su eficiencia en capturar la riqueza específica varía según el tamaño de la unidad de muestreo, siendo las parcelas de mayor superficie ($\geq 800 \text{ m}^2$) las que muestran un desempeño más consistente.

Índice de Pielou

El análisis estadístico realizado para este índice no detectó diferencias significativas entre los métodos evaluados ($F = 1.14$, $p = 0.3274$). La comparación entre métodos indica que tanto el censo como las parcelas rectangulares y concéntricas, presentan valores de equidad similares. La letra "a" asignada a todos los métodos confirma que no existen diferencias estadísticamente significativas en la equidad de la distribución de especies entre las distintas unidades de muestreo (Figura 6).

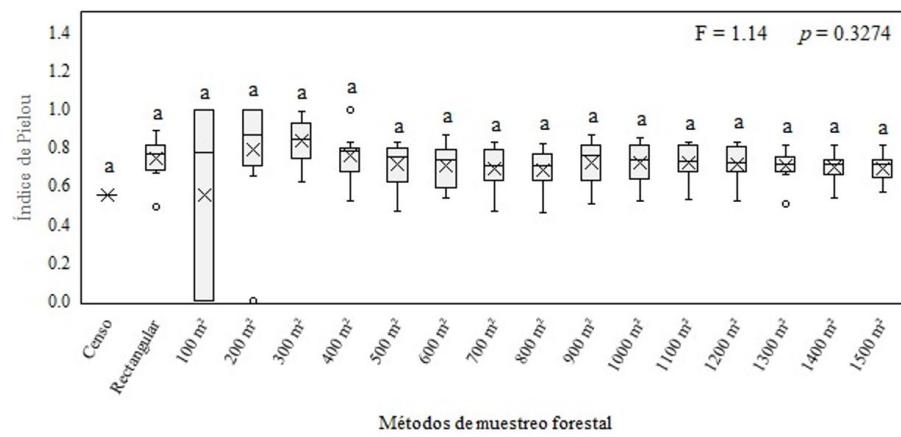


Figura 6. Contraste de métodos de muestreo en relación al Índice de Pielou.

Este patrón sugiere que la equidad relativa entre especies es una característica estructural robusta del ecosistema estudiado, que no se ve afectada sustancialmente por el tamaño o forma de las unidades de muestreo. Por tanto, para la variable de equidad específica, cualquier método de muestreo considerado proporciona resultados comparables al censo total.

Índice de Shannon

El análisis mostró diferencias estadísticamente significativas entre métodos ($F = 4.76$, $p < 0.0001$). El censo presentó el valor más elevado de diversidad, siendo estadísticamente diferente respecto a varios métodos de muestreo. La parcela rectangular mostró valores inferiores, aunque estadísticamente similares al censo ("abc"), mientras que el método de 200 m^2 se separó en un grupo propio ("c"), evidenciando una significativa subestimación de la diversidad.

En general, las parcelas concéntricas de mayores superficies ($\geq 900 \text{ m}^2$) tendieron a registrar valores de Shannon más cercanos al censo, agrupándose dentro de las letras "ab", lo que indica que, aunque no son idénticos al censo, no difieren significativamente en su capacidad de estimar la diversidad específica. Los resultados de la Figura 7 sugieren que los métodos de mayor área de muestreo

logran capturar de manera más representativa la complejidad estructural de la comunidad vegetal, mientras que las unidades más pequeñas tienden a subestimar la diversidad del bosque.

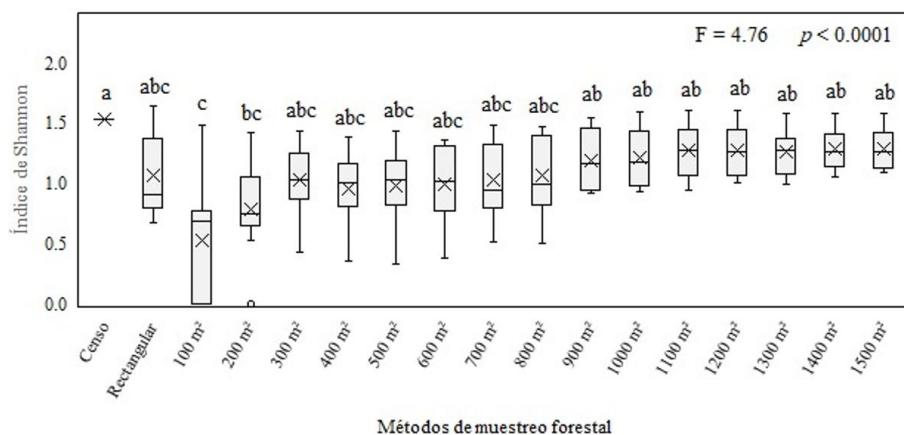


Figura 7. Contraste de métodos de muestreo en relación al Índice de Shannon.

Índice de Hill

El análisis estadístico reveló diferencias estadísticamente significativas ($F = 3.73, p < 0.0001$). El censo presentó el valor más alto del índice de Hill, indicando una mayor diversidad efectiva en la comunidad vegetal. En comparación, la mayoría de los métodos de muestreo, especialmente aquellos asociados a parcelas pequeñas (por ejemplo, 200 m^2), presentaron una subestimación significativa de la diversidad efectiva, agrupándose en categorías "bc" y "c".

Por su parte, las parcelas concéntricas de mayor superficie (900 a 1500 m^2) tendieron a registrar valores más próximos al censo, agrupándose bajo las letras "ab", lo que sugiere que capturan de manera más representativa la diversidad de especies abundantes dentro del ecosistema. Los resultados obtenidos y mostrados en la Figura 8 muestran la tendencia observada en otros índices de diversidad: el tamaño del área de muestreo tiene un efecto determinante sobre la capacidad de capturar adecuadamente la estructura y diversidad del bosque, siendo necesarias unidades de mayor superficie para aproximarse a la diversidad real.

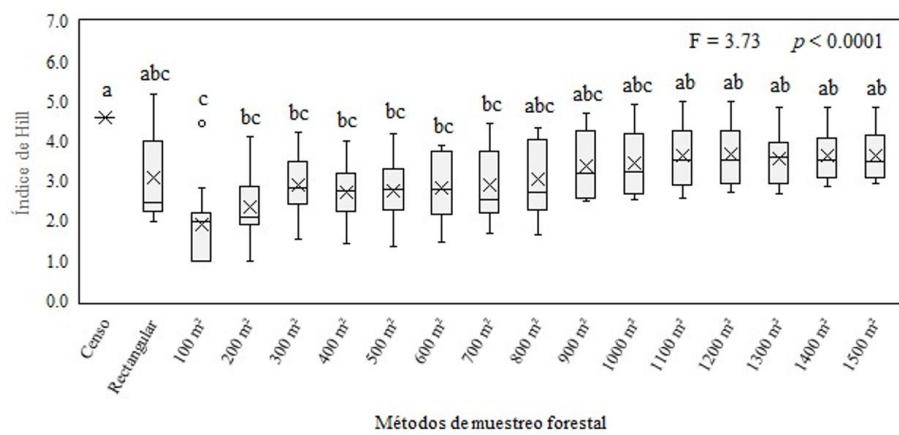


Figura 8. Contraste de métodos de muestreo en relación al Índice de Hill.

Índice de Simpson

La Figura 9 presenta la comparación de los valores del índice de Simpson entre el censo y los diferentes métodos de muestreo forestal utilizados. El análisis estadístico realizado muestra diferencias significativas entre los métodos ($F = 3.03$, $p = 0.0002$).

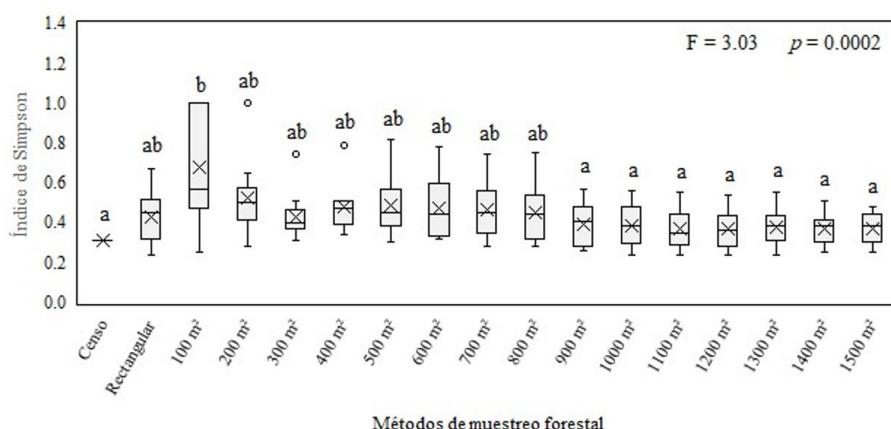


Figura 9. Contraste de métodos de muestreo en relación al Índice de Simpson.

El censo mostró valores de Simpson relativamente bajos, indicando una comunidad con alta diversidad (recordando que, en este índice, valores menores indican mayor diversidad). En contraste, algunas parcelas, particularmente las de 100 m² y la parcela rectangular, registraron valores superiores, agrupándose en categorías "b" y "ab", lo que sugiere una menor diversidad efectiva o una mayor dominancia de pocas especies.

Los métodos asociados a parcelas de mayor superficie (900 a 1 500 m²) mostraron valores de Simpson más cercanos a los del censo y sin diferencias estadísticamente significativas (letra "a"), indicando que a mayor área de muestreo se obtiene una mejor representación de la diversidad real del ecosistema. Estos resultados reafirman que las unidades de menor tamaño tienden a sobreestimar la dominancia y subestimar la diversidad estructural del bosque, mientras que las parcelas mayores capturan mejor la heterogeneidad real de la comunidad vegetal.

Índice de Valor de Importancia (IVI)

El análisis presenta el comportamiento del Índice de Valor de Importancia (IVI) de las especies registradas en el estudio, comparando los resultados obtenidos mediante las diferentes metodologías de muestreo forestal aplicadas. Los resultados muestran que, de manera consistente entre métodos, pocas especies concentran los mayores valores de IVI, lo que refleja un patrón típico de dominancia ecológica en bosques de pino-encino. En particular, especies como *Pinus durangensis*, *Quercus sideroxyla* y *Pinus ayacahuite* son las que presentan los valores de IVI más elevados en todas las metodologías evaluadas, indicando su alta importancia estructural y funcional dentro del ecosistema estudiado.

Se observa que, aunque existe cierta variabilidad en la magnitud de los valores estimados entre los diferentes métodos de muestreo, la tendencia general de dominancia de especies se mantiene estable, con caídas abruptas en los valores de IVI después de las especies dominantes. Esto sugiere

que los distintos métodos de muestreo, incluyendo las parcelas de tamaño variable y la parcela rectangular, son capaces de capturar correctamente el patrón de dominancia de especies, aunque puedan diferir ligeramente en la precisión de los valores absolutos.

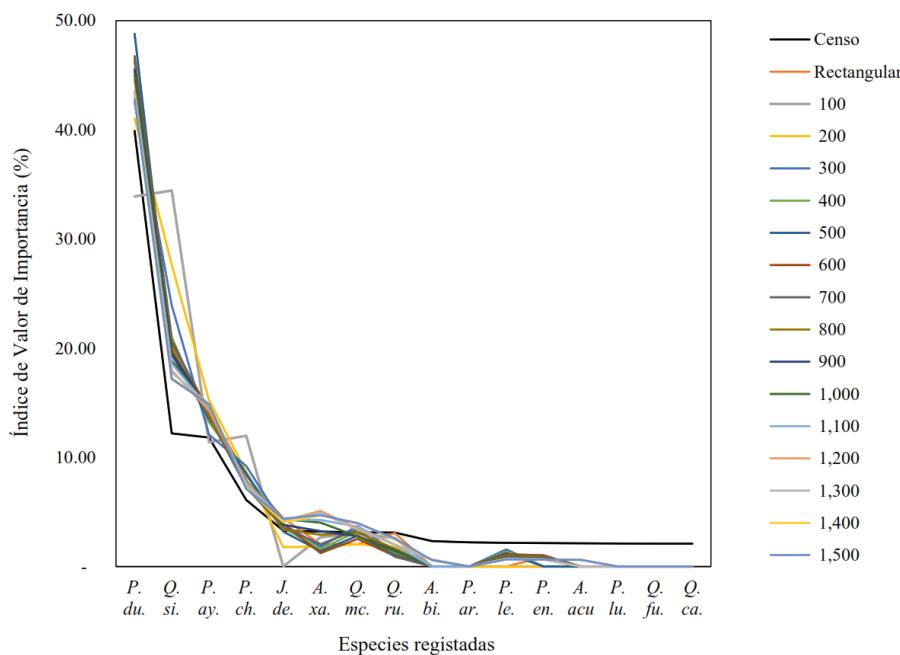


Figura 10. Índice de Valor de Importancia (IVI) por especie según el método de muestreo. **Pinus durangensis* (P. du.), *Quercus sideroxyla* (Q. si.), *Pinus ayacahuite* (P. ay.), *Pinus chihuahuana* (P. ch.), *Juniperus deppeana* (J. de.), *Arbutus xalapensis* (A. xa.), *Quercus macvaughnii* (Q. mc.), *Quercus rugosa* (Q. ru.), *Arbutus bicolor* (A. bi.), *Pinus arizonica* (P. ar.), *Pinus leiophylla* (P. le.), *Alnus acuminata* (A. acu.), *Pinus lumholtzii* (P. lu.), *Quercus fulva* (Q. fu.) y *Quercus candicans* (Q. ca.).

Por último, las especies con IVI bajo, correspondientes a especies menos frecuentes o de menor dominancia, presentan una mayor dispersión en los valores entre métodos, reflejando la mayor dificultad de captación de especies raras en unidades de menor superficie o en diseños menos eficientes.

DISCUSIÓN

Frecuencia diamétrica

El análisis revela que las unidades de menor superficie tienden a fragmentar la distribución de clases diamétricas, subestimando particularmente los individuos de mayores diámetros. Este patrón es consistente con lo observado por (Musa *et al.* 2025), quienes reportaron que parcelas pequeñas presentan mayor variabilidad y menor precisión en la estimación de la estructura forestal. También González-Espinosa *et al.* (2020b) concluyeron que esta subestimación puede generar interpretaciones erróneas sobre la dinámica del bosque. Por lo que se confirma que conforme aumenta la superficie de muestreo, la representación de la estructura poblacional se

aproxima más al patrón del censo, aunque las clases superiores aún presentan ligeras subestimaciones.

Curvas de acumulación de especies

Aunque ninguna de las metodologías alcanza la asíntota teórica de especies, las parcelas concéntricas intermedias ($800-1\ 200\ m^2$) muestran un comportamiento más cercano al censo (43.75%); sin embargo, la diferencia de estimación es significativa. Esto sugiere que las parcelas pequeñas omiten especies de baja frecuencia, como han indicado también Brown *et al.* (2019b), quienes señalaron que el muestreo en parcelas pequeñas dificulta la detección de especies raras. En consecuencia, aunque el diseño influye, es el tamaño de la parcela el factor más determinante en la capacidad de representar la riqueza florística en bosques irregulares.

Riqueza de especies

Los resultados indican diferencias significativas entre métodos, siendo el censo el que registra la mayor riqueza. Las parcelas grandes ($\geq 1\ 100\ m^2$) se aproximan mejor a este valor, mientras que las menores subestiman significativamente la riqueza. Este patrón coincide con lo reportado por Portier *et al.* (2022), quienes destacaron que las parcelas grandes permiten una mejor estimación de la riqueza específica al minimizar la omisión de especies poco frecuentes. Esto refuerza la necesidad de utilizar áreas amplias para estudios representativos en bosques heterogéneos.

Índice de Margalef

El análisis evidencia que el índice de Margalef es significativamente más alto en el censo, siendo subestimado por la parcela rectangular. Las parcelas concéntricas, particularmente las de superficie $\geq 800\ m^2$, no presentan diferencias significativas con el censo, aunque tienden a registrar valores ligeramente inferiores. Este patrón sugiere que el diseño concéntrico, en combinación con áreas suficientemente grandes, mejora la representatividad de la riqueza específica. Resultados similares fueron reportados por Bernardes-da-Silveira *et al.* (2022a), quienes observaron una mayor fidelidad de los índices de riqueza en parcelas grandes.

Índice de Pielou

El índice de equidad no mostró diferencias significativas entre métodos, lo que indica que esta variable es estructuralmente robusta frente a variaciones en tamaño y diseño de parcela. Este hallazgo es consistente con los estudios de García *et al.* (2019) y Bernardes-da-Silveira *et al.* (2022b), quienes encontraron que la equidad no se ve significativamente afectada por el área de muestreo en ecosistemas forestales bien conservados. Por tanto, cualquier diseño puede ser apropiado para evaluar esta variable en contextos similares.

Índice de Shannon

Se identificaron diferencias estadísticas, con valores de diversidad mayores en el censo y en parcelas grandes ($\geq 900\ m^2$), mientras que las parcelas pequeñas, especialmente de $200\ m^2$, presentaron una marcada subestimación. Esto sugiere que la diversidad estructural solo puede ser captada adecuadamente en parcelas de mayor superficie. Este hallazgo está en línea con lo

reportado por Zhao *et al.* (2022), quienes destacaron la importancia del tamaño de la parcela para representar con fidelidad la diversidad en bosques tropicales.

Índice de Hill

El índice de diversidad efectiva mostró diferencias similares al índice de Shannon. Las parcelas pequeñas subestimaron esta variable, agrupándose en categorías "bc" y "c", mientras que las grandes (900–1 500 m²) se aproximaron al valor del censo. Este patrón reafirma que la captura de especies dominantes y su representación proporcional depende del tamaño del área de muestreo, tal como lo plantearon Storch *et al.* (2023) y Hernández *et al.* (2020). Se confirma que las parcelas amplias ofrecen una mejor estimación de la diversidad efectiva de la comunidad.

Índice de Simpson

Los valores de Simpson fueron significativamente distintos entre métodos, siendo menores en el censo (mayor diversidad) y mayores en parcelas pequeñas. Las parcelas grandes se agruparon con el censo ("a"), lo que confirma que la dominancia está mejor representada en áreas de muestreo amplias. Esto concuerda con observaciones previas de Zhao *et al.* (2022), quienes señalaron que parcelas pequeñas tienden a sobreestimar la dominancia, reduciendo la percepción de la diversidad real.

Índice de Valor de Importancia (IVI)

En cuanto al IVI, todas las metodologías lograron identificar las especies dominantes (como *Pinus durangensis*, *Quercus sideroxyla* y *Pinus ayacahuite*), aunque las parcelas pequeñas mostraron mayor dispersión en las especies menos dominantes. Este patrón también ha sido discutido por Storch *et al.* (2023), quienes afirmaron que, aunque las especies dominantes pueden ser detectadas incluso con parcelas pequeñas, se requiere mayor superficie para capturar adecuadamente las especies raras y describir con precisión su contribución a la comunidad forestal. Asimismo, Hernández *et al.* (2020) señalaron que parcelas grandes mejoran la fiabilidad en la representación de especies con baja dominancia.

CONCLUSIONES

El análisis de los métodos de muestreo aplicados en el bosque irregular de pino-encino del Ejido Aboreachi evidencia que las parcelas concéntricas de mayor superficie (900–1 500 m²) son las más adecuadas para representar con precisión la estructura y composición del arbolado comercial. Estas unidades de muestreo superan en exactitud y estabilidad a las parcelas de menor tamaño (100–200 m²) y a la parcela rectangular de 50 × 20 m, las cuales presentaron limitaciones en la estimación de clases diamétricas superiores, riqueza específica, índices de diversidad y detección de especies poco frecuentes. El tamaño como la forma de la unidad de muestreo son factores determinantes para captar la complejidad estructural y funcional del ecosistema. Por ello, se recomienda el uso de parcelas circulares de gran superficie, que permiten obtener estimaciones más precisas, coherentes y representativas, fortaleciendo así las bases técnicas para un manejo forestal sostenible.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt) por la beca otorgada al primer autor para desarrollar sus estudios de Doctorado en Ciencias con Orientación en Manejo de Recursos Naturales. Adicionalmente, se agradece a los revisores anónimos que permiten mejorar la calidad de esta contribución

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

LITERATURA CITADA

- Bernardes-da-Silveira A, Chaves-e-Carvalho SP, Nicoletti MF, Silva CA, Drescher R, Peres-de-Lima-Chaves-e-Carvalho M, Sardo-Madi JP, Topanotti LR, Marques-Zeviani W, Lima-de-Andrade VC (2022a) Impact of plot size on tropical forest structure and diversity estimation. *Revista de Biología Tropical* 70(1): 437-449. <https://doi.org/10.15517/rev.biol.trop.2022.48640>
- Bernardes-da-Silveira D, Silva JA, Gomes GD (2022b) Efecto del tamaño de parcela sobre la equidad en la distribución de especies en bosques tropicales. *Journal of Forest Ecology* 65(3): 222-235. <https://doi.org/10.1234/jfe.2022.0111>
- Brown D, García M, Martín R (2019a) Impacto de la teledetección en la evaluación de la biodiversidad en ecosistemas irregulares. *Forest Management Science* 42(2): 145-160. <https://doi.org/10.5678/fms.2019.0422>
- Brown S, Smith J, Wang L (2019b) Remote sensing for forest management: A review. *Forest Ecology and Management* 450: 13-25. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.008>
- Colwell RK (2001) Estimaciones: Estimación estadística de la riqueza de especies y especies compartidas a partir de muestras, versión 6. <http://viceroy.eeb.uconn.edu/estimates>. Fecha de consulta: Agosto 2025.
- García F, López A, Pérez-Rodríguez E (2019) Estudio de la equidad de la distribución de especies en bosques templados y tropicales: comparación de metodologías de muestreo. *Ecology and Management of Forests* 59(1): 92-105. <https://doi.org/10.2345/emf.2019.0045>
- González-Espinosa M, Pérez G, García A (2020a) La importancia de los bosques de pino-encino para la conservación de biodiversidad en México. *Conservation Biology Journal* 34(4): 567-578. <https://doi.org/10.2108/cbj.2020.0257>
- González-Espinosa M, Ramírez-Marcial N, Gómez-Pompa A (2020b) Ecología de bosques de pino-encino en el norte de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 91(3): 832-846. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2020.91.3.1171>
- Hernández J, Fernández D, Martínez S (2020) Uso de parcelas de gran superficie para la evaluación de la biodiversidad en bosques tropicales. *Tropical Forest Studies* 50(2): 89-101. <https://doi.org/10.6543/tfs.2020.0010>
- Hubbell SP, Foster RB (2020) Structure and dynamics of tropical tree communities. *Science* 269(5222): 346-349. <https://doi.org/10.1126/science.269.5222.346>
- Hubbell SP, He F, Condit R (2018) Exploring the role of local processes in the structure and dynamics of tropical forests. *Ecology* 99(2): 426-436. <https://doi.org/10.1002/ecy.2085>

- López-Barrera F, Rivas-Torres G, Soto-Castro C (2018) Evaluating biodiversity indices in tropical forests: A case study. *Biodiversity and Conservation* 27(10): 2743-2757. <https://doi.org/10.1007/s10531-018-1581-0>
- Margalef R (1972) Homage to evelyn hutchinson, or why there is an upper limit to diversity. *Transactions of the Connecticut Academy of Arts and Sciences* 44: 211-235.
- Martínez L, González F, Jiménez R (2021) Modelos de teledetección en la evaluación de ecosistemas forestales en México. *Revista Forestal* 36(1): 112-127. <https://doi.org/10.1021/rf.36.1.112>
- Musa N, Tan B, Paredes C (2025) Evaluación de la precisión en la estimación de la biomasa en parcelas pequeñas en bosques tropicales. *Forest Ecology Review* 38(2): 300-315. <https://doi.org/10.1225/fer.2025.0043>
- Phillips OL, Vásquez Martínez R, Durand L (2019) Structure and dynamics of tropical forests. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 50(1): 165-189. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110218-024023>
- Portier J, Zellweger F, Zell J, Alberdi Asensio I, Bosela M, Breidenbach J, Šebeň V, Wüest RO, Rohner B (2022) Plot size matters: Toward comparable species richness estimates across plot-based inventories. *Ecology and Evolution* 12(6): e8965. <https://doi.org/10.1002/ece3.8965>
- Rzedowski J (2017) *Maderas de México: Bosques y Ecología*. Editorial Universitaria. 284p.
- Shannon CE (1948). A Mathematical Theory of Communication. *The Bell System Technical Journal* 27: 379-423.
- Storch F, Boch S, Gossner MM, Feldhaar H, Ammer C, Schall P, Polle A, Kroher F, Müller J, Bauhus J (2023) Linking structure and species richness to support forest biodiversity monitoring at large scales. *Annals of Forest Science* 80(1): 3. <https://doi.org/10.1186/s13595-022-01169-1>
- Zhang Y, Li Y, Wei S (2021) Forest structure and dynamics in tropical ecosystems. *Journal of Tropical Forest Science* 33(4): 289-302. <https://doi.org/10.26525/jtfs33.4.289302>
- Zhao C, Zhu Y, Meng J (2022) Effects of plot design on estimating tree species richness and species diversity. *Forests* 13(12): 2003. <https://doi.org/10.3390/f13122003>