



DOI: [10.29298/rmcf.v15i81.1430](https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i81.1430)

Artículo de investigación

Integridad ecológica en un bosque bajo producción maderable del centro de México

Ecological integrity in a forest under timber production in central Mexico

Martha Azucena Rendón-Pérez¹, Patricia Hernández-de la Rosa^{1*}, Valentín J. Reyes-Hernández¹, Alejandro Velázquez-Martínez¹, José Luis Alcántara-Carbajal²

Fecha de recepción/Reception date: 31 de agosto de 2023.

Fecha de aceptación/Acceptance date: 17 de enero de 2024.

¹Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Postgrado en Ciencias Forestales. México.

²Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Postgrado en Recursos Genéticos y Productividad-Ganadería. México.

*Autor para correspondencia; correo-e: pthr@colpos.mx

*Corresponding author; e-mail: pthr@colpos.mx

Resumen

La integridad ecológica (IE) es la propiedad de un ecosistema para soportar y mantener una comunidad de organismos cuya composición, diversidad y organización funcional sea comparable con un hábitat natural de la región. Este concepto es útil para conocer el grado de conservación de un ecosistema, por lo que es de interés en la gestión forestal. El objetivo fue desarrollar y aplicar un Índice de Integridad Ecológica (IIE) en una zona de bosque templado con aprovechamiento maderable. El lugar presentó cuatro asociaciones vegetales: tres bajo aprovechamiento maderable (*Pinus montezumae*, *P. patula* y *P. pseudostrobus*) y una correspondiente a un área de conservación (*Pinus-Quercus*). Para calcular el índice, se evaluó la estructura, composición y función del bosque a través de 20 indicadores, correspondientes a tres atributos ecológicos: paisaje, vegetación y suelo. Se establecieron cuatro categorías posibles: excelente, buena, regular y baja. El mayor valor del IIE se obtuvo en el área de conservación en la categoría excelente, mientras que en las asociaciones bajo aprovechamiento, la de *P. patula* se clasificó como excelente y las de *P. montezumae* y *P. pseudostrobus* se clasificaron como buenas. En el área bajo aprovechamiento se requiere observación e intervención mínima para mantener y mejorar la IE. El IIE permitió caracterizar las asociaciones bajo manejo, además de identificar los indicadores que requieren de intervención o mayor investigación para mantener la IE. Se generó así una línea base del conocimiento de la IE en el área de estudio, que puede ser útil para su gestión.

Palabras clave: Composición de especies, diversidad vegetal, estructura de comunidades, función ecosistémica, Índice de Integridad Ecológica, manejo forestal.

Abstract

Ecological integrity (EI) is the property of an ecosystem to support and maintain a community of organisms whose composition, diversity, and functional organization is comparable to a natural habitat in the region. This

concept is useful to know the degree of conservation of an ecosystem; therefore, it is of interest in forest management. The objective of this study was to develop and apply an Ecological Integrity Index (*EII*) in an area of temperate forest with timber harvesting. The site had four plant associations: three under timber harvesting (*Pinus montezumae*, *P. patula*, and *P. pseudostrobus*), and one corresponding to a conservation area (*Pinus-Quercus*). In order to calculate the index, the structure, composition, and function of the forest were evaluated through 20 markers, corresponding to three ecological attributes: landscape, vegetation, and soil. Four possible categories were established: excellent, good, fair and poor. The highest value of the *EII* was obtained in the conservation area, in the excellent category, while in the associations under harvesting, that of *P. patula* was rated excellent, and those of *P. montezumae* and *P. pseudostrobus* were rated good. In the area under harvesting, observation and minimal intervention are required to maintain and improve EI. The *EII* made it possible to characterize the associations under management, in addition to identifying the markers that require intervention or further research to maintain EI. This generated a baseline of knowledge of EI in the study area, which may be useful for its management.

Key words: Species composition, plant diversity, community structure, ecosystem function, Ecological Integrity Index, forest management.

Introducción

La integridad ecológica (IE) es la habilidad de un sistema ecológico para soportar y mantener una comunidad de organismos con una composición, diversidad y organización funcional comparable con un hábitat natural de la región (Parrish *et al.*, 2003), Tierney *et al.* (2009) la precisan como una medida de la composición, estructura y función de un ecosistema en relación con el intervalo natural de variación, así como las perturbaciones naturales y antropogénicas.

Los índices de IE conjuntan diferentes variables para caracterizar a un ecosistema y contribuyen a resolver desafíos como asegurar la protección de los ecosistemas con objetivos, problemáticas, usos y valores múltiples (Carter *et al.*, 2016). Se desarrollaron con el propósito de evaluar la condición del ecosistema, la efectividad de la gestión (Tierney *et al.*, 2009), conocer el estado de conservación de la biodiversidad de manera sólida, práctica y comparable en el espacio y el tiempo (Parrish *et al.*, 2003; Santibáñez-Andrade *et al.*, 2015), tomar decisiones de manejo

(Gara y Stapanian, 2015), guiar los esfuerzos de monitoreo (Wurtzebach y Schultz, 2016) y desarrollar políticas basadas en la evidencia (Rempel *et al.*, 2016).

La investigación y el monitoreo ambiental son necesarios para entender y gestionar los ecosistemas (Haughland *et al.*, 2010), y cada día son más pertinentes debido a la pérdida de biodiversidad y degradación ecológica que enfrentan. La evaluación de los ecosistemas no solo debe enfocarse en registrar la pérdida de superficie, sino también en registrar su condición actual. Este conocimiento puede ser útil para el monitoreo a través del tiempo, la identificación de tendencias, priorizar sitios para la conservación o restauración y guiar acciones de manejo (Fennessy *et al.*, 2007).

Debido a que la aplicación del concepto de IE y el desarrollo de un protocolo para su evaluación en un bosque bajo aprovechamiento comercial maderable se han explorado en muy pocos estudios a nivel nacional, se consideró que su implementación permitiría comprender como impactan las prácticas de manejo y tratamientos silvícolas a los componentes estructurales, de composición y función. Además, con esta información, se tendrá una línea base que ofrezca la posibilidad de dirigir las decisiones de manejo para reducir los impactos negativos al ecosistema forestal. Se eligió el ejido El Nopalillo, Hidalgo, debido a que se realiza aprovechamiento maderable bajo un programa de manejo forestal desde 1979, principalmente a través del Método de Desarrollo Silvícola (MDS), que consiste en aplicar una corta de regeneración de árboles semilleros, además de tratamientos intermedios como las cortas de liberación, aclareos no comerciales, podas y dos aclareos comerciales, en un turno de 50 años. Al momento de la evaluación, el ejido tenía la certificación nacional de Manejo Forestal Sustentable (NMX-AA-143-SCFI-2015) desde 2017 y del Consejo de Administración Forestal (FSC, por sus siglas en inglés) a partir de 2018 (Rendón, 2020).

Por tanto, el objetivo en esta investigación fue evaluar la integridad ecológica en un bosque manejado de clima templado del ejido El Nopalillo, en el estado de Hidalgo, México, mediante el desarrollo e implementación de un protocolo para obtener un

Índice de Integridad Ecológica (*IIE*) aplicable a la región de estudio. La hipótesis principal fue que el aprovechamiento maderable y los tratamientos silvícolas aplicados influyen sobre la estructura, composición y función del ecosistema, lo que impactaría en forma negativa el valor del *IIE* respecto al obtenido en el bosque destinado a la conservación.

Materiales y Métodos

Área de estudio

La investigación se llevó a cabo en el ejido El Nopalillo, municipio Epazoyucan, específicamente en el cerro de Las Navajas, Sierra de Pachuca (una sección de la Sierra Madre Oriental), Hidalgo, México. Es un núcleo agrario que tiene un programa de manejo forestal desde 1979; la extensión del ejido es de aproximadamente 550 ha destinadas a la producción maderable mediante el Método de Desarrollo Silvícola (MDS), y de las cuales se evaluó un total de 306 ha con y sin intervención silvícola.

El gradiente altitudinal del lugar varía de 2 800 a 3 100 m; existen cuatro asociaciones vegetales, tres de ellas bajo aprovechamiento maderable y dominadas por: (1) *Pinus montezumae* Lamb. (111 ha), (2) *Pinus pseudostrobus* Lindl. (68 ha) y (3) *Pinus patula* Schltldl. & Cham. (66 ha), y (4) Un área destinada a la conservación compuesta por pino-encino (PQ) (61 ha) que no ha tenido intervención humana en al menos 50 años. El clima es semifrío y templado subhúmedo; los

suelos son de tipo Feozem y Andosol (Figura 1). La fauna está compuesta por aves como pájaros carpinteros (*Sphyrapicus thyroideus* (Cassin, 1852)) y colibrí color café (*Colibri thalassinus* (Swainson, 1827)), mamíferos como ardillas (*Sciurus aureogaster* F. Cuvier, 1829) y armadillos (*Dasypus novemcinctus* Linnaeus, 1758), además de reptiles como serpientes de cascabel (*Crotalus intermedius* Troschel, 1865) y víboras chirrioneras (*Coluber* spp.) (Rendón, 2020).

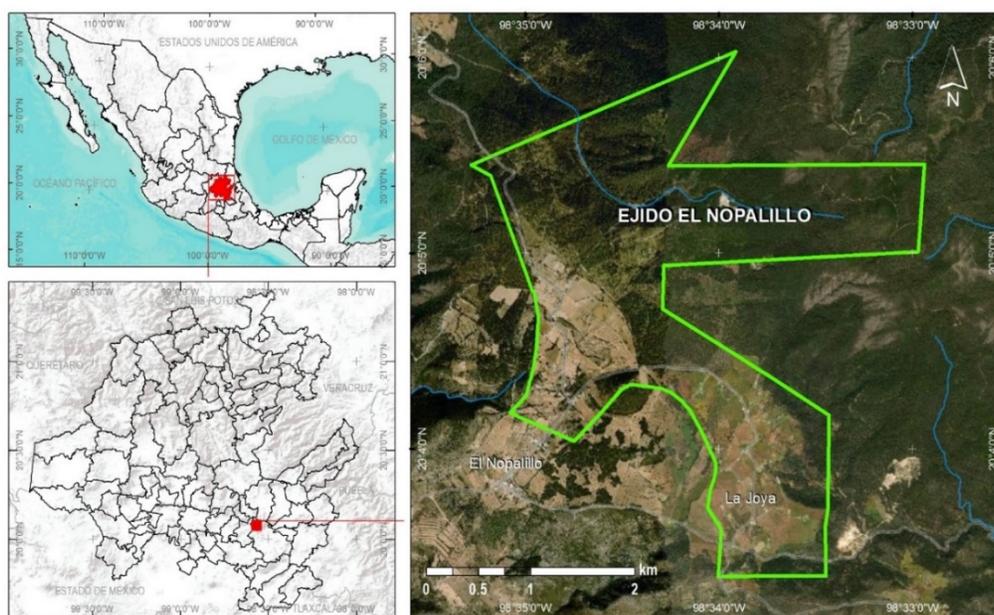


Figura 1. Ubicación del área de estudio de integridad ecológica en bosques bajo manejo forestal en el ejido El Nopalillo, Epazoyucan, Hidalgo, México.

Protocolo para obtener el *IIE*

La propuesta metodológica para evaluar la IE del área de estudio consistió de tres fases (Cuadro 1), en el cual se consideraron protocolos de evaluación de IE en el continente americano y el aporte de autores como Kapos *et al.* (2002), Parrish *et al.* (2003), Tierney *et al.* (2009), Schroeder *et al.* (2011) y Carter *et al.* (2016).

Cuadro 1. Fases y pasos para el desarrollo de un protocolo para la evaluación de la integridad ecológica de bosques templados en el ejido El Nopalillo, Epazoyucan, Hidalgo, México.

Fase	Paso
1	1. Elaboración del modelo conceptual 2. Definición de los objetivos de gestión 3. Identificación de atributos ecológicos 4. Definición de escalas de análisis 5. Selección de indicadores
2	6. Evaluación de indicadores y análisis de información 7. Identificación de un intervalo aceptable de variación para cada indicador 8. Calificación de los indicadores para determinar si están o no dentro de los intervalos de variación aceptables 9. Estimación del valor del índice de IE
3	10. Informe de los resultados 11. Uso de los resultados para informar, evaluar y retroalimentar las acciones de la gerencia 12. Repetir la evaluación de forma sistemática

Adaptado de: Tierney *et al.* (2009), Schroeder *et al.* (2011) y Carter *et al.* (2016).

La fase 1 consistió en la construcción teórica del proceso de evaluación de la IE, en la que se identificaron los componentes, atributos, indicadores y medidas útiles para la evaluación.

Se desarrolló un modelo ecológico conceptual (Figura 2) mediante el cual se seleccionaron al paisaje, la vegetación y el suelo como los tres atributos ecológicos con el papel más importante en el mantenimiento de la IE del ecosistema (Schroeder *et*

al., 2011). Los atributos se caracterizan por 20 indicadores (Cuadro 2) que se relacionan con la estructura (nivel de ocupación del sitio a partir de la densidad del arbolado en la superficie evaluada), composición (relacionada a la taxonomía de especies e indicadores ecológicos de especies vegetales), y función (propiedades del suelo y del área basal como indicadora de la capacidad de captura de carbono) del ecosistema.

Componentes	Atributos ecológicos	Indicadores	Unidades
Estructura	Paisaje	Superficie	Hectáreas
		Densidad de regeneración arbórea Densidad arbórea Densidad de árboles maduros Densidad de árboles muertos en pie Densidad de tocones	Individuos/hectáreas
Composición	Vegetación	Regeneración Número de especies Índice de <i>Margalef</i> Índice de <i>Simpson</i> Número de especies en alguna categoría de riesgo Número o cobertura de especies nativas Número o cobertura de especies invasoras Índice de Valor de Importancia del género <i>Pinus</i> L. y otras especies arbóreas	Número de géneros nativos Número de especies nativas Número de especies <i>IVI</i> especies nativas Número de especies <i>IVI</i> especies invasoras <i>IVI</i> arbolado
Función		Área basal	m ² /ha
	Suelo	Relación C:N Contenido de materia orgánica del suelo Capacidad de intercambio catiónico Profundidad del ocochal Cobertura de suelo desnudo	Razón Porcentaje Cmol(+)/kg Centímetros Porcentaje

Figura 2. Modelo ecológico conceptual para la evaluación de la integridad ecológica de los bosques del ejido El Nopalillo, Epazoyucan, Hidalgo, México.

Cuadro 2. Matriz de resultados por indicador y asociación vegetal en el ejido El Nopalillo, Epazoyucan, Hidalgo, México.

Indicador	PQ	Pmn	Pps	Ppt
Superficie (ha)	60.94	111.25	68.13	65.45
Composición de regeneración arbórea (número de géneros)	4	7	5	6
Número de especies (árboles, arbustos y hierbas)	39	60	58	62
Índice de <i>Simpson</i> (1-D)	0.8	0.7	0.7	0.8
Índice de <i>Margalef</i>	1.6	1.4	1.4	1.6
Especies en riesgo (en la NOM-059-SEMARNAT-2010)	0	1	0	2
<i>IVI</i> (Índice de Valor de Importancia) especies nativas	100 %	100 %	100 %	100 %
<i>IVI</i> (Índice de Valor de Importancia) especies invasoras	0	0	0	0
<i>IVI</i> (Índice de Valor de Importancia) <i>Pinus</i> sp.	49 %	88 %	88 %	78 %
Regeneración arbórea (individuos con Diámetro normal $DN < 7.5$ cm ha ⁻¹)	34	30	47	79
Densidad (árboles ha ⁻¹)	632	448	658	568
Densidad de árboles maduros ($DN > 50$ cm y Altura total $H > 25$ m) (árboles ha ⁻¹)	10	0	0	0
Densidad de árboles muertos en pie (árboles ha ⁻¹)	18	0	0	1
Densidad de tocones (tocones ha ⁻¹)	57	116	238	112
Relación C:N	40.98	29.52	32.2	33.15
Materia Orgánica del suelo (<i>MOS</i>) (%)	25.91	28.33	15.91	21.34
Capacidad de Intercambio Catiónico (<i>CIC</i>) (Cmol(+) kg ⁻¹)	59.1	63.53	37.1	55.3
Profundidad del ocochal (cm)	7	5	4	6
Cobertura de suelo desnudo (%)	2.9	3	4.4	10
Área basal (<i>AB</i>) (m ² ha ⁻¹)	28	17	17	11

PQ = Asociación *Pinus-Quercus* (Área de conservación); Pmn = Asociación *Pinus montezumae* Lamb.; Pps = Asociación de *P. pseudostrobus* Lindl.; Ppt = Asociación de *P. patula* Schltld. & Cham. (Áreas bajo aprovechamiento maderable).

La producción maderable se identificó como principal objetivo de gestión, ya que cualquier objetivo dentro de la Fase 1 se debe relacionar con los atributos en los que se medirán los indicadores (Tierney *et al.*, 2009) (Cuadro 1). En este caso se esperaba evaluar propiedades relevantes del ecosistema con respecto al aprovechamiento forestal.

La selección de los indicadores cumplió con los siguientes requisitos: (A) Permitir distinguir un estado "intacto" y funcional de uno degradado o altamente impactado, (B) Responder a disturbios naturales o antropogénicos, y (C) Ser factibles, rentables y que, en su conjunto, abordaran estructura, composición y función del ecosistema (Tierney *et al.*, 2009). Los indicadores seleccionados se obtuvieron a nivel de sitio (Figura 2).

La Fase 2 consistió en la recolección, procesamiento y análisis de los datos de campo. Se elaboró un mapa base a partir de imágenes satelitales con el cual se validaron los polígonos registrados en campo para las cuatro asociaciones. La toma de información de los indicadores se realizó durante junio-agosto de 2018. Se diseñó un muestreo aleatorio (intensidad de 1 %) dentro de cada asociación vegetal, a partir de la sobreposición de una malla de puntos equidistantes cada 100 m, para un total de 79 unidades de muestreo: 65 en las áreas con manejo y 14 en la zona de conservación (Rendón, 2020). Para cada unidad de muestreo, se establecieron sitios circulares de 400 m², anidados y en el centro dentro de estos se ubicó un subsitio circular de 12.56 m² y cuatro subsitios cuadrados de 1 m² localizados en los cuatro rumbos francos. En cada sitio se midieron y evaluaron variables dasométricas y ecológicas de árboles, arbustos y hierbas, respectivamente (Rendón, 2020; Rendón-Pérez *et al.*, 2021).

De manera complementaria se recolectaron muestras de suelo de 500 g en los primeros 30 cm de suelo mineral para 50 % de las unidades de muestreo por asociación vegetal. Posteriormente se obtuvo una muestra compuesta de 1 kg por

asociación y tres repeticiones, para un total de 12 muestras que fueron utilizadas en la obtención de los indicadores de función. Se registró información general de los sitios como coordenadas geográficas y altitud utilizando un GPS *Garmin*[®] Etrex, pendiente con un hipsómetro *Nikon*[®] Forestry Pro II, además de exposición, profundidad de hojarasca y porcentaje de cobertura de rocas (Rendón, 2020).

Posteriormente a la evaluación de indicadores, se estableció el rango natural de variación (RNV), que se refiere a la línea base a partir de la cual es posible identificar si los indicadores en particular o la IE en general del sitio están dentro de un intervalo aceptable o no (Schroeder *et al.*, 2011). Su determinación debe realizarse a partir de su contraste con sitios donde la intervención humana ha sido mínima (Stoddard *et al.*, 2006). En este caso se usó la información recopilada en campo en el área de conservación con la asociación de PQ, la revisión de literatura científica, resultados del Inventario Estatal Forestal 2014 (Conafor, 2015) y la consulta a expertos para hacer posible la identificación de un intervalo aceptable de variación para cada indicador. Como resultado se establecieron cuatro categorías: Excelente (A), Bueno (B), Regular (C) y Bajo (D), cada una con un puntaje específico por la C (2 puntos) y la D (1 punto) (Cuadro 3).

Cuadro 3. Intervalo de valoración de los indicadores por categoría para la evaluación de la integridad ecológica en el ejido El Nopalillo, Epazoyucan, Hidalgo, México.

Indicador	A (4 puntos)	B (3 puntos)	C (2 puntos)	D (1 punto)
Superficie absoluta (ha)	≥50	≥40, <50	≥30, <40	<30
Composición de la regeneración arbórea (número de géneros nativos)	≥10	7-9	4-6	≤3
Número de especies de árboles, arbustos y hierbas	≥50	≥40, <50	≥30, <40	<30
Índice de <i>Simpson</i> (1-D)	≥0.75	≥0.50, <0.75	≥0.25, <0.50	<0.25
Índice de <i>Margalef</i>	≥1.5	≥1, <1.5	≥0.5, <1	<0.5
Especies en riesgo (dentro de la NOM-059-SEMARNAT-2010)	≥5	3-4	1-2	0
IVI (Índice de Valor de Importancia)	≥95	≥75, <95	≥50, <75	<50

especies nativas (%)				
<i>IVI</i> (Índice de Valor de Importancia) especies invasoras (%)	0	<5	≥5, <10	≥10
<i>IVI</i> (Índice de Valor de Importancia) género <i>Pinus</i> L. (%)	≤60	>60, ≤80	>80, ≤90	>90
Regeneración arbórea (individuos ha ⁻¹)	≥75	≥50, <75	≥25, <50	<25
Densidad (árboles ha ⁻¹)	≥300	≥200, <300	≥100, <200	<100
Densidad de árboles maduros Diámetro normal <i>DN</i> >50 cm, Altura total <i>H</i> >25 m (árboles ha ⁻¹)	≥10	≥4, <10	≥1, <4	0
Densidad de árboles muertos en pie (árboles ha ⁻¹)	≥10	≥4, <10	≥1, <4	0
Densidad de tocones (tocones ha ⁻¹)	≤25	>25, ≤75	>76, ≤150	>150
Relación C:N	≥25	≥20, <25	≥15, <20	<15
Materia Orgánica del suelo (<i>MOS</i>) (%)	≥25	≥20, <25	≥15, <20	<15
Capacidad de Intercambio Catiónico (<i>CIC</i>) (Cmol(+) kg ⁻¹)	≥50	≥40, <50	≥30, <40	<30
Profundidad del ocochal (cm)	≥5	4 a 5	1 a 3	0
Cobertura de suelo desnudo (%)	≤5	≤10, >5	≤15, >10	>15
Área basal (<i>AB</i>) (m ² ha ⁻¹)	≥25	≥20, <25	≥15, <20	<15

Se evaluó cada indicador para determinar el estado de sus atributos y, de acuerdo con la categoría en la que se le clasificó, se le asignó el puntaje correspondiente. Finalmente se calculó la calificación de cada asociación vegetal a través de su sumatoria y se estandarizaron los totales (dividiendo la sumatoria entre 0.8, dado que el máximo puntaje posible era 80) para obtener un valor del *IIE* entre 0 y 100. Los intervalos del *IIE* se agruparon en cuatro categorías: Excelente (A) de 76 a 100 puntos, Bueno (B) de 51 a 75 puntos, Regular (C) de 26 a 50 puntos y Bajo (D) de 0 a 25 puntos (Cuadro 4).

Cuadro 4. Calificación e interpretación de las categorías de integridad ecológica del bosque del ejido El Nopalillo, Epazoyucan, Hidalgo, México.

Categoría (puntaje del <i>IIE</i>)	Descripción
--	-------------

Excelente (A): De 76 a 100 puntos	Nivel deseable de la IE, es necesaria poca o nula intervención humana para que los indicadores y atributos se mantengan dentro del rango natural de variación (RNV). La estructura y composición vegetal indican diversidad alta y los indicadores de función están dentro del RNV, por tanto, el ecosistema es funcional.
Bueno (B): De 51 a 75 puntos	Nivel aceptable de la IE con poca intervención humana necesaria para mantenerla. La estructura y composición con un impacto moderado. La función del ecosistema no se encuentra comprometida. Se requiere de observación para asegurar su continuidad.
Regular (C): De 26 a 50 puntos	Nivel de deterioro de la IE no deseable y es necesaria la intervención para su corrección. Varios indicadores están fuera del RNV. Las funciones del ecosistema están comprometidas y tendrán consecuencias negativas en el mediano y largo plazo.
Baja (D): De 0 a 25 puntos	Fuerte impacto sobre la IE, su condición actual es crítica y no deseable, se requiere intervención inmediata para su corrección. La mayoría de los indicadores se encuentran fuera del RNV. Las funciones del ecosistema están comprometidas y habrá consecuencias ambientales negativas en el corto plazo.

Resultados

Los bosques estudiados del ejido El Nopalillo, en general, presentaron una IE en las categorías excelente y buena; aunque el aprovechamiento maderable tuvo un impacto negativo sobre algunos indicadores de estructura y composición, las funciones analizadas del ecosistema se mantuvieron en un intervalo aceptable.

El conjunto de indicadores mostró que las actividades de manejo forestal mantuvieron la cobertura del bosque y la riqueza de especies vegetales, además de que favorecieron las condiciones para que las especies nativas predominaran y resistieran ante la posible proliferación de especies invasoras después de los aprovechamientos maderables. Las cuatro asociaciones vegetales obtuvieron puntajes altos a partir de los indicadores de superficie, cobertura de especies

nativas, especies invasoras, densidad del arbolado y relación C:N, lo que indica un muy buen grado de conservación (Cuadro 2, Cuadro 3).

El valor más alto del *IIE* (86 puntos) se obtuvo para el área de conservación (PQ) (Figura 3) y se ubicó en la categoría excelente con los indicadores de estructura, composición y función dentro del RNV, por lo que se requiere poca o nula intervención humana. El valor del *IIE* es resultado de los indicadores de diversidad y riqueza (índices de *Simpson* y *Margalef*), la cantidad de especies nativas y la baja o nula presencia de especies invasoras, mayor porcentaje de especies del género *Pinus* L., una mayor densidad de árboles maduros, mayor área basal (*AB*) y menor densidad de tocones. Además, los indicadores de función (suelo) fueron los más altos (Cuadro 2, Cuadro 3).

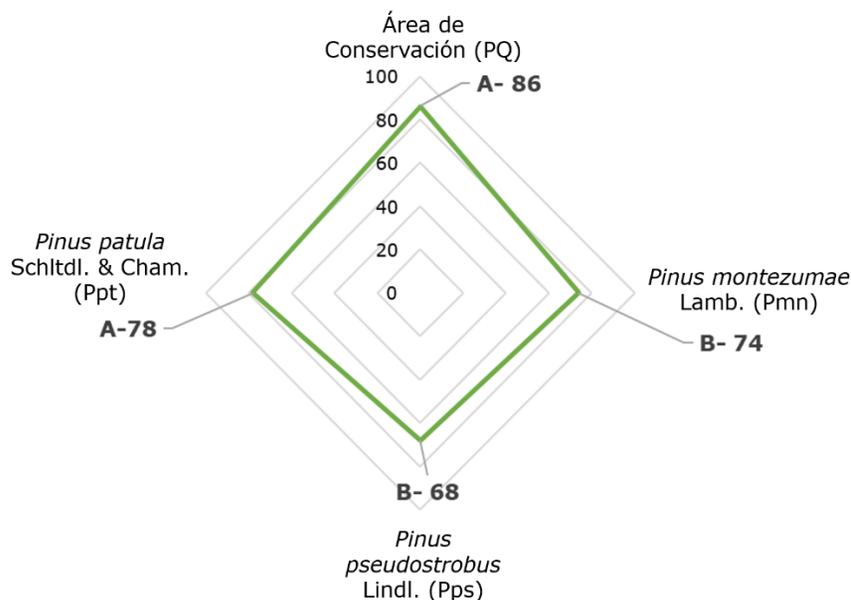


Figura 3. Categoría e Índice de Integridad Ecológica por cada tipo de asociación vegetal del ejido El Nopalillo, Epazoyucan, Hidalgo, México.

Por otro lado, en las asociaciones bajo aprovechamiento maderable, el indicador de número de especies obtuvo el puntaje más alto, mientras que los indicadores con los valores más bajos fueron la densidad de árboles maduros y árboles muertos en pie. Particularmente, la asociación de *P. patula* (Ppt) presentó el mayor valor del *IIE* (78 puntos) en la categoría excelente (Figura 3), y los indicadores mejor calificados fueron riqueza en la regeneración arbórea, índices de *Margalef* y *Simpson*, cobertura de suelo desnudo y profundidad del ocochal (Cuadro 2, Cuadro 3).

El menor valor del *IIE* lo obtuvo la asociación de *P. pseudostrobus* (Pps) con 68 puntos y una categoría buena (Figura 3), el nivel de integridad se considera aceptable, aunque se requiere poca intervención humana para mantenerla o mejorarla. Hay un impacto moderado sobre la estructura y composición, y aunque la función del ecosistema no se encuentra comprometida, el monitoreo es necesario para garantizar su continuidad o mejora. Los indicadores que contribuyeron con un menor valor fueron especies en riesgo, densidad de árboles maduros, árboles muertos en pie y densidad de tocones. En la misma categoría, pero con 74 puntos, se encontró a la asociación de *P. montezumae* (Pmn) (Figura 3), donde los atributos con la calificación más baja fueron los mismos que para Pps, con excepción de la densidad de tocones (Cuadro 2, Cuadro 3).

Discusión

Experiencias en diferentes partes del mundo han demostrado la utilidad de integrar diferentes variables para conocer la IE (Hansen *et al.*, 2021), por ejemplo, en parques canadienses (Parks Canada Agency, 2011) y algunos bosques nacionales en el noreste de los EE. UU. (Tierney *et al.*, 2009), o en análisis

globales a nivel del paisaje para capturar el estado de conservación de los bosques (Grantham *et al.*, 2020). Lo anterior fue posible por el incremento del número y la capacidad de sensores satelitales y las redes de investigación para monitorear y evaluar la integridad de los ecosistemas (Hansen *et al.*, 2021).

En México se ha integrado la información del Sistema Nacional de Monitoreo de la Biodiversidad y el Inventario Nacional Forestal y de Suelos con datos satelitales para obtener un Índice de Integridad Ecológica a nivel nacional (García-Alaniz *et al.*, 2017), además de la condición de integridad del paisaje considerando a los depredadores superiores (Mora, 2021). De la misma manera, Mora (2022) propone un marco conceptual para analizar la integridad forestal utilizando indicadores de la complejidad ecológica en los bosques mexicanos con atributos como la biodiversidad (riqueza y composición de especies vegetales), estructura y desarrollo del dosel y sotobosque, además de indicadores de efectos humanos sobre la complejidad estructural.

Aunque los ejemplos anteriores corresponden a escalas espaciales diferentes a la utilizada en el presente estudio, Rempel *et al.* (2016), Karr *et al.* (2022) y Mora (2022) coinciden en que el concepto de IE y el marco conceptual para integrar múltiples datos en un solo índice es una manera práctica de concentrar información compleja útil para caracterizar, informar y tomar decisiones relacionadas con la gestión de recursos naturales y que es deseable contar con información a nivel local.

Además de lo anterior, el uso de índices multi-métricos es una consecuencia de que la gestión de los bosques ha evolucionado desde el interés exclusivamente productivo a un enfoque más amplio, donde es importante garantizar de forma sostenible una variedad de bienes y servicios de los ecosistemas y, de forma simultánea, conservar la biodiversidad y los procesos ecológicos (Lindenmayer y Cunningham, 2013). Por tanto, una gestión eficaz de los bosques de producción debería mantener los rendimientos sin reducir su IE (MacDicken *et al.*, 2015)

considerando elementos de perturbación y función del hábitat (Rempel *et al.*, 2016; Bisbing *et al.*, 2022).

La propuesta metodológica presentada ofrece algunas ventajas para los encargados de gestionar los recursos forestales. Es práctica, ya que se usan datos que se recopilan de manera regular en los inventarios forestales y que son necesarios para implementar el plan de manejo, además se enriquece al incorporar algunas variables que ofrecen un análisis del grado de conservación de los bosques manejados, sobre todo a escala local. Complementariamente, resulta útil dado que identifica el estado de conservación de cada indicador, por lo que facilitaría la toma de decisiones y recomendaciones basadas en la evidencia (Rempel *et al.*, 2016; Karr *et al.*, 2022). Además, puede adaptarse y actualizarse de manera periódica y utilizarse por predios bajo aprovechamiento maderable, no maderable o exclusivamente destinados a la conservación.

Una posible limitación de esta propuesta es que se realizó con datos actuales (es decir, en el momento de la evaluación), por lo que el historial de perturbaciones o las condiciones previas en el área de conservación se desconocen ya que no se encuentran documentadas. Otros reportes proporcionan un marco conceptual para seleccionar estados de referencia factibles, identificando áreas con valores de biodiversidad más altos en relación con otras ubicaciones dentro del mismo ecosistema, independientemente del historial de perturbaciones (McNellie *et al.*, 2020), o bien, a través de la selección de áreas contemporáneas de baja presión humana (Scholes y Biggs, 2005). El área estudiada cumplió, en la medida de lo posible, con ambos criterios.

Las áreas bajo manejo en este estudio cuentan con la información de los planes de manejo, sin embargo, las modificaciones o adaptaciones, o incluso perturbaciones naturales o humanas, no están identificadas para cada asociación, lo cual sería recomendable para llevar a cabo una evaluación más

detallada. Aun así, estos resultados representan la línea base a partir de la cual es posible detectar cambios futuros (Karr *et al.*, 2022).

Al incorporar datos sobre estructura, composición y función del ecosistema, fue posible caracterizar y cuantificar diferencias entre asociaciones vegetales y tipos de gestión (aprovechamiento maderable vs conservación) que serían difíciles de percibir a través de las evaluaciones tradicionales (Rempel *et al.*, 2016). El área de conservación mantiene valores altos de riqueza y diversidad que son importantes, pero no necesariamente los únicos indicadores de integridad en un ecosistema (Karr *et al.*, 2022; Mora, 2022); al incorporar al sotobosque (arbustos y hierbas) en la evaluación de diversidad vegetal se evalúa un estrato poco considerado tanto en áreas con y sin manejo (Rendón-Pérez *et al.*, 2021). Los bosques sin intervenciones recientes tendrían una mayor presencia de arbolado maduro y también de árboles muertos en pie como indicadores de etapas sucesionales avanzadas (Keeton, 2006), lo que sucede en el área PQ, además de una menor densidad de tocones ya que este indicador está relacionado con el aprovechamiento forestal. De la misma manera, se ha encontrado que indicadores con una riqueza alta de especies nativas representan una ventaja para mantener la integridad, ya que confieren resistencia a la invasión de especies no deseables (Pyke *et al.*, 2010).

En las áreas bajo aprovechamiento maderable se presentaron indicadores como el mayor porcentaje de especies de pino, lo cual era de esperarse ya que uno de los objetivos del MDS es la generación de masas coetáneas mono-específicas, aunque en la zona también se favorecen otras especies arbóreas (Rendón, 2020). Consecuentemente, hay una nula o baja presencia de arbolado maduro o muerto en pie, a pesar de que algunas asociaciones se encontraban cerca del turno de 50 años. La mayor densidad de tocones contrasta con lo encontrado en el área PQ, pero esto también refleja las acciones de cambio en la estructura y composición como resultado de la gestión forestal (Bisbing *et al.*, 2022).

Dentro de los indicadores de función, el *AB* se considera como una medida de la capacidad del bosque para producir biomasa (Mora, 2022). En las áreas bajo manejo, los valores son menores que en *PQ*, ya que por lo general áreas bajo gestión se encuentran en etapas sucesionales juveniles (Keeton, 2006). De manera contrastante, indicadores con valores altos en estas asociaciones fueron el contenido de materia orgánica del suelo con el potencial que presenta para aportar elementos esenciales para las plantas mediado por la textura, el pH, la temperatura y la humedad del suelo (Bot y Benites, 2005). La materia orgánica también influye en la capacidad de intercambio catiónico o potencial para mantener la fertilidad del suelo (Thiers *et al.*, 2014), y la profundidad del ocochal (capa de hojarasca y residuos orgánicos) es una de las fuentes de energía de los ecosistemas (Tierney, 2009), además de que se convierte en un indicador con un alto potencial para mantener cubierto el suelo y evitar procesos erosivos (Pellant *et al.*, 2005).

En general, las estrategias de manejo forestal para conservar la IE son demasiado complejas para ser sometidas a experimentación (Simberloff, 2001; Drever *et al.*, 2006; Perera *et al.*, 2008; Klenk *et al.*, 2009), por lo que se requieren formas de evaluación objetivas que permitan saber si el enfoque de manejo está conservando la IE (Carignan y Villard, 2002). La propuesta en este trabajo puede ser utilizada para solventar esta problemática, ya que a través de los resultados será posible contar con información para mantener, adecuar o rechazar las estrategias de gestión.

Conclusiones

El valor mayor del *IIE* se presentó en el área de conservación (PQ) al compararse con las áreas bajo aprovechamiento, lo que confirma la hipótesis planteada. Por tanto, los valores del *IIE* fueron menores en las asociaciones vegetales bajo aprovechamiento maderable, pero obtuvieron categorías de IE excelente y buena. Influyó en esta calificación el deterioro en los indicadores relacionados con la estructura y la composición del ecosistema debido a la implementación de tratamientos silvícolas, cuyo objetivo es obtener un bosque estructuralmente regular mediante su coetaneidad.

Agradecimientos

Al ejido El Nopalillo, Epazoyucan, Hidalgo, por las facilidades otorgadas para el desarrollo de este trabajo.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Martha Azucena Rendón-Pérez: recolección de información en campo, determinación taxonómica, análisis de la información y redacción del documento; Patricia Hernández-de la Rosa: conceptualización y dirección de la investigación, revisión y corrección del documento; Valentín J. Reyes-Hernández: revisión y corrección del documento; Alejandro Velázquez-Martínez: revisión y corrección del documento; José Luis Alcántara-Carbajal: revisión y corrección del documento.

Referencias

- Bisbing, S. M., B. J. Buma, B. V. Naald and A. L. Bidlack. 2022. Single-tree salvage logging as a response to Alaska yellow-cedar climate-induced mortality maintains ecological integrity with limited economic returns. *Forest Ecology and Management* 503:119815. Doi: 10.1016/j.foreco.2021.119815.
- Bot, A. and J. Benites. 2005. The importance of soil organic matter. Key to drought-resistant soil and sustained food production. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Rome, RM, Italy. 78 p.
- Carignan, V. and M. A. Villard. 2002. Selecting indicator species to monitor ecological integrity: A review. *Environmental Monitoring and Assessment* 78:45-61. Doi: 10.1023/A:1016136723584.
- Carter, S. K., N. B. Carr, C. H. Flather, E. Fleishman, ... and D. J. A. Wood. 2016. Assessing ecological integrity using multiscale information from Bureau of Land Management Assessment and Monitoring Programs. In: Carter, S. K., N. B. Carr, K. H. Miller and D. J. A. Wood (Edits.). *Multiscale Guidance and Tools for implementing a landscape approach to resource management in the Bureau of land management*. United States Department of the Interior and United States Geological Survey. Reston, VA, United States of America. pp. 39-53.
- Comisión Nacional Forestal (Conafor). 2015. *Inventario estatal forestal y de suelos-Hidalgo 2014*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) y Conafor. Zapopan, Jal., México. 163 p.
- Drever, C. R., G. Peterson, C. Messier, Y. Bergeron and M. Flannigan. 2006. Can forest management based on natural disturbances maintain ecological resilience? *Canadian Journal of Forest Research* 36(9):2285-2299. Doi: 10.1139/x06-132.

- Fennessy, M. S., A. D. Jacobs and M. E. Kentula. 2007. An evaluation of rapid methods for assessing the ecological condition of wetlands. *Wetlands* 27:543-560. Doi: 10.1672/0277-5212(2007)27[543:AEORMF]2.0.CO;2.
- Gara, B. D. and M. A. Stapanian. 2015. A candidate vegetation index of biological integrity based on species dominance and habitat fidelity. *Ecological Indicators* 50:225-232. Doi: 10.1016/j.ecolind.2014.10.029.
- Garcia-Alaniz, N., M. Equihua, O. Pérez-Maqueo, J. Equihua B., ... and M. Schmidt. 2017. The Mexican National Biodiversity and Ecosystem Degradation Monitoring System. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 26-27:62-68. Doi: 10.1016/j.cosust.2017.01.001.
- Grantham, H. S., A. Duncan, T. D. Evans, K. R. Jones, ... and J. E. M. Watson. 2020. Anthropogenic modification of forests means only 40% of remaining forests have high ecosystem integrity. *Nature Communications* 11:5978. Doi: 10.1038/s41467-020-19493-3.
- Hansen, A. J., B. P. Noble, J. Veneros, A. East, ... and A. L. S. Virnig. 2021. Toward monitoring forest ecosystem integrity within the post-2020 Global Biodiversity Framework. *Conservation Letters* 14(4):e12822. Doi: 10.1111/conl.12822.
- Haughland, D. L., J. M. Hero, J. Schieck, J. G. Castley, ... and W. E. Magnusson. 2010. Planning forwards: biodiversity research and monitoring systems for better management. *Trends in Ecology and Evolution* 25(4):199-200. Doi: 10.1016/j.tree.2009.11.005.
- Kapos, V., I. Lysenko and R. Lesslie. 2002. Assessing forest integrity and naturalness in relation to biodiversity. On behalf of FAO as part of the Global Forest Resources Assessment 2000. Forestry Department, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Rome, RM, Italy. 65 p.
- Karr, J. R., E. R. Larson and E. W. Chu. 2022. Ecological integrity is both real and valuable. *Conservation Science and Practice* 4(2):e583. Doi: 10.1111/csp2.583.

- Keeton, W. S. 2006. Managing for late-successional/old-growth characteristics in northern hardwood-conifer forests. *Forest Ecology and Management* 235(1-3):129-142. Doi: 10.1016/j.foreco.2006.08.005.
- Klenk, N. L., G. Q. Bull and J. I. MacLellan. 2009. The "emulation of natural disturbance" (END) management approach in Canadian forestry: A critical evaluation. *The Forestry Chronicle* 85(3):440-445. Doi: 10.5558/tfc85440-3.
- Lindenmayer, D. B. and S. A. Cunningham. 2013. Six principles for managing forest as ecological sustainable ecosystems. *Landscape Ecology* 28:1099-1110. Doi: 10.1007/s10980-012-9720-9.
- MacDicken, K. G., P. Sola, J. E. Hall, C. Sabogal, M. Tadoum and C. de Wasseige. 2015. Global progress toward sustainable forest management. *Forest Ecology and Management* 352:47-56. Doi: 10.1016/j.foreco.2015.02.005.
- McNellie, M. J., I. Oliver, J. Dorrough, S. Ferrier, G. Newell and P. Gibbons. 2020. Reference state and benchmark concepts for better biodiversity conservation in contemporary ecosystems. *Global Change Biology* 26(12):6702-6714. Doi: 10.1111/gcb.15383.
- Mora, F. 2021. Integridad Ecológica de México: El papel de los depredadores superiores ante la pérdida de hábitat y del capital natural. In: Navarro M., M. del C., B. Vargas M., A. Trejo C. y D. A. Ambriz G. (Comps.). *Acciones en México para recuperar poblaciones de mamíferos en riesgo*. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa. Iztapalapa, México D. F., México. pp.45-66.
- Mora, F. 2022. A suite of ecological indicators for evaluating the integrity of structural eco-complexity in Mexican forests. *Ecological Complexity* 50:101001. Doi: 10.1016/j.ecocom.2022.101001.
- Parks Canada Agency. 2011. Consolidated guidelines for ecological integrity monitoring in Canada's National Parks. Parks Canada Agency. Gatineau, QC, Canada. 115 p. https://parks.berkeley.edu/sites/parks.berkeley.edu/files/Parks%20Canada%20EI_%20Monitoring%20Guidelines_ENG_FINAL_Sept29%20%281%29.pdf. (28 de agosto de 2023).

- Parrish, J. D., D. P. Braun and R. S. Unnasch. 2003. Are we conserving what we say we are? Measuring Ecological Integrity within Protected Areas. *BioScience* 53(9):851-860. Doi: 10.1641/0006-3568(2003)053[0851:AWCWW]2.0.CO;2.
- Perera, A. H., L. J. Buse and M. G. Weber (Edits.). 2008. *Emulating Natural Forest Landscape Disturbances: Concepts and Applications*. Columbia University Press. New York, NY, United States of America. 352 p.
- Pellant, M., P. Shaver, D. A. Pyke and J. E. Herrick. 2005. Interpreting indicators of rangeland health. Technical Reference 1734-6. Version 4. United States Department of the Interior and United States Department of Agriculture. Denver, CO, United States of America. 122 p.
- Pyke, D. A., M. L. Brooks and C. D'Antonio. 2010. Fire as a restoration tool: A decision framework for predicting the control or enhancement of plants using fire. *Restoration Ecology* 18(3):274-284. Doi: 10.1111/j.1526-100X.2010.00658.x.
- Rempel, R. S., B. J. Naylor, P. C. Elkie, J. Baker, J. Churcher and M. J. Gluck. 2016. An indicator system to assess ecological integrity of managed forests. *Ecological Indicators* 60:860-869. Doi: 10.1016/j.ecolind.2015.08.033.
- Rendón P., M. A. 2020. Manejo forestal e integridad ecológica en el Ejido El Nopalillo, Hidalgo. Tesis de Maestría en Ciencias. Postgrado en Ciencias Forestales, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Texcoco, Edo. Mex., México. 102 p.
- Rendón-Pérez, M. A., P. Hernández-de la Rosa, A. Velázquez-Martínez, J. L. Alcántara-Carbajal y V. J. Reyes-Hernández. 2021. Composición, diversidad y estructura de un bosque manejado del centro de México. *Madera y Bosques* 27(1):1-19. Doi: 10.21829/myb.2021.2712127.
- Santibáñez-Andrade, G., S. Castillo-Argüero, E. V. Vega-Peña, R. Lindig-Cisneros and J. A. Zavala-Hurtado. 2015. Structural equation modeling as a tool to develop conservation strategies using environmental indicators: The case of the forests of the Magdalena river basin in Mexico City. *Ecological Indicators* 54:124-136. Doi: 10.1016/j.ecolind.2015.02.022.

Scholes, R. J. and R. Biggs. 2005. A biodiversity intactness index. *Nature* 434:45-49. Doi: 10.1038/nature03289.

Schroeder, M. A., R. C. Crawford, F. J. Rocchio, D. J. Pierce and M. V. Haegen. 2011. Ecological integrity assessments: Monitoring and evaluation of wildlife areas in Washington. Washington Department of Fish and Wildlife. Washington, D. C., United States of America. 236 p.

Simberloff, D. 2001. Management of boreal forest biodiversity-A view from the outside. *Scandinavian Journal of Forest Research* 16(S3):105-118. Doi: 10.1080/028275801300090726.

Stoddard, J. L., D. P. Larsen, C. P. Hawkins, R. K. Johnson and R. H. Norris. 2006. Setting expectation for the ecological condition of streams: The concept of reference condition. *Ecological Applications* 16(4):1267-1276. Doi: 10.1890/1051-0761(2006)016[1267:SEFTEC]2.0.CO;2.

Thiers, O., J. Reyes, V. Gerding y J. E. Schlatter. 2014. Suelos en ecosistemas forestales. In: Donoso, C., M. E. González y A. Lara (Edits.). *Ecología forestal. Bases para el manejo sustentable y conservación de los bosques nativos de Chile*. Ediciones UACH. Valdivia, V, Chile. pp. 133-178.

Tierney, G. L., D. Faber-Langendoen, B. R. Mitchell, W. G. Shriver and J. P. Gibbs. 2009. Monitoring and evaluating the ecological integrity of forest ecosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment* 7(6):308-316. Doi: 10.1890/070176.

Wurtzebach, Z. and C. Schultz. 2016. Measuring ecological integrity: History, practical applications, and research opportunities. *Bioscience* 66(6):446-457. Doi: 10.1093/biosci/biw037.



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.