

Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GEOSIG). Revista digital del Programa de Docencia e Investigación en Sistemas de Información Geográfica (PRODISIG). Universidad Nacional de Luján, Argentina.

<http://www.revistageosig.wixsite.com/geosig> (ISSN 1852-8031)

Luján, Año 15, Número 27, 2023, Sección I: Artículos. pp. 1-21

FRAGMENTACIÓN FORESTAL Y CAPTURA DE CARBONO EN UN PARQUE NACIONAL DEL ESTADO DE MÉXICO

Santiago Medina Silva – Jesús Gutiérrez Cedillo – Miguel Balderas Plata – José Isabel Pérez

Universidad Autónoma del Estado de México
santi040695@gmail.com

RESUMEN

En el presente estudio se realizó un análisis espacial con el objetivo de identificar los niveles de fragmentación forestal en los bosques presentes en el Área Natural Protegida (ANP) Parque Nacional Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla durante el año 2022, mediante la aplicación de herramientas de teledetección y Sistemas de Información Geográfica (SIG). En la zona central del Parque Nacional se ubica la autopista México – Toluca, que ha propiciado el desarrollo de actividades turísticas, lo que ha provocado un incremento en la fragmentación de los ecosistemas forestales como consecuencia de la demanda de nuevos espacios para áreas recreativas y restaurantes tradicionales. La metodología que se aplicó en este estudio consta de las siguientes etapas: 1) clasificación e identificación de los ecosistemas presentes en el Parque y cuantificación del área ocupada por cada ecosistema forestal, mediante fotointerpretación cartográfica; 2) delimitación y ubicación espacial de cada tipo de ecosistema; 3) cálculo de la fragmentación por cada ecosistema forestal y 4) cálculo de la captura de carbono. Esto permitió identificar las zonas con los niveles de menor densidad forestal y mayor fragmentación dentro del área de estudio. Los resultados obtenidos consisten en la representación cartográfica de los niveles de fragmentación en los ecosistemas forestales representados en cinco rangos Likert; se identificó que los niveles de fragmentación forestal más altos se ubican en la zona centro y sur del parque, donde se desarrolla infraestructura para servicios turísticos.

Palabras clave: Análisis espacial, Fragmentación forestal, Ecosistemas forestales, Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla, Validación de cartografía.

ABSTRACT

In the present study, a spatial analysis was carried out with the objective of identifying the levels of forest fragmentation in the forests present in the Protected Natural Area (ANP) Parque Nacional Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla during the year 2022, through the application of remote sensing tools and Geographic Information Systems

(GIS). The Mexico - Toluca highway is located in the central area of the National Park, which has fostered the development of tourist activities, which has caused an increase in the fragmentation of forest ecosystems as a result of the demand for new spaces for recreational areas and restaurants. traditional. The methodology applied in this study consists of the following stages: 1) classification and identification of the ecosystems present in the Park and quantification of the area occupied by each forest ecosystem, through cartographic photo-interpretation; 2) delimitation and spatial location of each type of ecosystem; 3) calculation of fragmentation for each forest ecosystem and 4) calculation of carbon sequestration. This allowed us to identify the zones with the lowest levels of forest density and the highest fragmentation within the study area. The results obtained consist of the cartographic representation of the fragmentation levels in the forest ecosystems represented in five Likert ranges; It was identified that the highest levels of forest fragmentation are located in the central and southern zone of the park, where infrastructure for tourist services is developed.

Keywords: Spatial analysis, Forest fragmentation, Forest ecosystems, Insurgent Miguel Hidalgo y Costilla, Cartography validation.

INTRODUCCIÓN

Existen diversas causas que propician la fragmentación de la cobertura forestal, algunas son de carácter natural y otras de tipo antrópico. Entre las naturales encontramos plagas y enfermedades, otras generados por desastres naturales, como deslaves y deslizamientos. Las antrópicas incluyen, la deforestación ya sea por tala clandestina, incremento de la frontera agrícola o aumento en zonas urbanas, o la instalación de infraestructura para complejos turísticos.

En el Parque Nacional Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla (PNIMH), el deterioro y degradación ambiental de los ecosistemas forestales va en incremento, a consecuencia de los servicios turísticos y el aumento de la mancha urbana, repercutiendo directa e indirectamente en otros ciclos naturales y provocando una serie de dificultades como la disminución de la infiltración y recarga de los mantos freáticos de la región (ECCAP-CONANP, 2015).

De acuerdo con el análisis realizado por la Dirección del Parque Nacional, los ecosistemas forestales con los niveles altos de densidad forestal se ubican sobre terrenos que presentan fuertes pendientes, lo cual ha representado una barrera natural para que no se desarrollen actividades antropogénicas, razón por la cual se ha mantenido su estado de conservación en las partes altas. Cabe destacar que las cubiertas forestales conservadas permiten mitigar los eventos climáticos que pueden ser más frecuentes e intensos debido a variaciones climáticas.

Debido a que el Parque Nacional es atravesado por diferentes vías de comunicación, como la carretera libre México – Toluca, la autopista México – Toluca y la carretera La Marquesa – Santiago Tianguistenco, no existen puntos de acceso controlado al Parque Nacional, razón por la cual no se cuenta con las restricciones necesarias para mediar la entrada de maquinaria pesada utilizada para actividades ilícitas de tala ilegal. Entre otros factores la limitante de autoridades y la ineficacia de normas y leyes planteadas en el plan de manejo del parque, han provocado una disminución en la densidad de los ecosistemas forestales (CONANP, 2008).

En este sentido, es de gran importancia ubicar mediante cartografía detallada las zonas que presentan los niveles de fragmentación más altos en la zona de estudio, lo que contribuirá a que existan herramientas para la toma de decisiones por parte de las autoridades ambientales del parque y para la recuperación de estos espacios (CONABIO, 2016).

Con base a lo descrito previamente, fue necesario analizar mediante SIG los niveles de fragmentación forestal presentes en el parque, identificando con mayor precisión las zonas prioritarias de atención, sin dejar de lado la confiabilidad de los datos (Mas *et al.*, 2003).

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

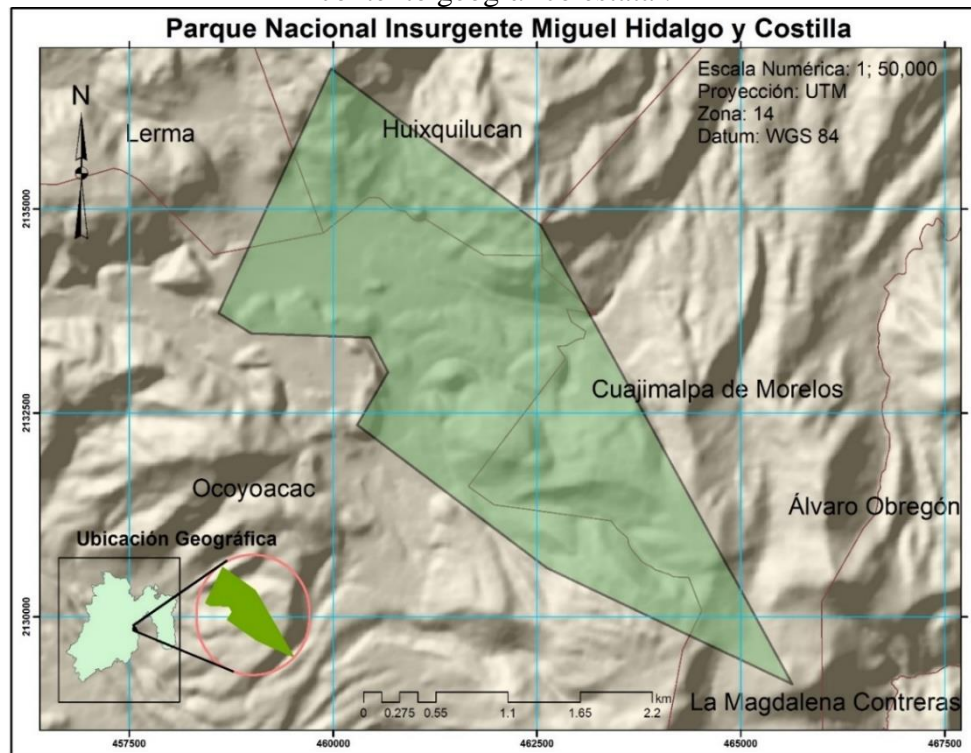
Los materiales utilizados para la elaboración del análisis espacial de los niveles de fragmentación en los ecosistemas forestales para el año 2022, fueron una imagen y datos vectoriales.

La imagen de satélite de los sensores Spot 5 con fecha de 19 de enero del año 2022, fue descargada del servidor digital Earth Explorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos USGS (2022). Para la edición cartográfica se obtuvieron datos vectoriales de la plataforma digital del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2022).

Área de estudio

El Parque Nacional se encuentra ubicado dentro de los municipios de Huixquilucan, Lerma y Ocoyoacac del Estado de México y la Delegación Cuajimalpa de la Ciudad de México (Figura N 1). El Parque Nacional Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla fue decretado el 18 de septiembre de 1936 con una extensión territorial de 1,889.96 hectáreas. Se localiza geográficamente entre los meridianos de coordenadas 99° 19' 40" y 99° 23' 31" de longitud Oeste y entre los paralelos de 19° 15' 20" y 19° 19' 20" de latitud Norte (Vargas, 2000).

Figura 1. Localización del Parque Nacional Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla en el contexto geográfico estatal.



Fuente: Elaboración propia con base en INEGI, (2015).

Los componentes de análisis de este estudio corresponden a los distintos ecosistemas ambientales y usos del suelo que se presentan distribuidos espacialmente en el territorio del ANP Parque Nacional Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla. La identificación de los ecosistemas se realizó con base en la carta de uso de suelo y vegetación del año 2015, en escala 1:50,000 (INEGI, 2015).

Las etapas para la identificación de los niveles de fragmentación forestal en los bosques del parque consistieron en preclasificación, clasificación de imágenes de satélite, validación de la cartografía y análisis de la fragmentación.

Preclasificación

Se tomaron en cuenta factores climatológicos al elegir la fecha de descarga de las imágenes, ya que Rejas (2008) considera que la atmósfera cambia de una fecha a otra, por lo que es necesario corregir los valores de las radiancias registrados por el sensor. De igual forma la atmósfera puede afectar las características de la imagen aparente del objeto, como son la longitud de onda, reflectividad de la superficie y variabilidad espacial.

Inicialmente se procesó el compuesto color natural (bandas 3-2-1), 3 (visible rojo), 2 (visible verde), 1 (visible azul), con el fin de tener una mejor visualización y digitalizar los sitios o campos de entrenamiento (número de píxeles representativos por categoría).

El número y distribución espacial de los campos de entrenamiento se elaboró de forma aleatoria y homogénea, a través de la interpretación de los compuestos generados previamente, verificados mediante recorridos de campo “*in situ*” con GPS, y precisados con la visualización cartográfica en plataformas digitales de representación espacial (Google Earth).

La delimitación de los campos de entrenamiento se realizó con base en la regla general establecida por Jensen (1996) que consiste en seleccionar como mínimo 10 veces el número de bandas utilizadas en el desarrollo de las estadísticas de entrenamiento.

Posteriormente, se integraron un mínimo de 100 campos para cada una de las categorías, se digitalizaron un total de 600 puntos, de los cuales 100 corresponden al bosque de pino, 100 al bosque de oyamel, 100 a la vegetación secundaria, 100 a la agricultura, 100 a la zona urbana y 100 a los cuerpos de agua.

Clasificación de imágenes de satélite

Los métodos y procesamientos planteados en las fases metodológicas de preclasificación y clasificación fueron implementados en el software de análisis espacial ArcGis 10.2. La clasificación de las dos imágenes de satélite se realizó mediante la herramienta Image classification. Previamente se ratificó cada punto delimitado en los sitios de entrenamiento para cada ecosistema, de esta forma se estableció la representatividad de las muestras identificadas.

Una vez identificados los diferentes ecosistemas, se procedió a clasificar las imágenes aplicando el criterio de máxima verosimilitud (Maximum Likelihood Classification), donde el algoritmo automáticamente clasificó toda el área, de acuerdo con el tipo de píxel que presenta reflectancia de un color del píxel respecto a los demás, lo cual permite ajustar con mayor robustez la disposición original de los datos, al estimar la precisión de la clasificación (Toro *et al.*, 2015). A partir de la aplicación de este método se generó el mapa final de los ecosistemas forestales en el PNIMH para el año 2022.

Validación de la cartografía de los ecosistemas forestales del año 2022

Los datos obtenidos sobre la superficie de cada ecosistema identificado (cartografía del año 2022), fueron sometidos a una validación con el fin de obtener el grado de fiabilidad, el proceso de evaluación de la confiabilidad temática se divide en tres etapas: a) diseño de muestreo, b) evaluación de los sitios de verificación y c) análisis de los datos (Mas *et al.*, 2003).

Diseño de muestreo

Esta fase consiste en establecer las unidades de muestreo, el método de muestreo y el tamaño de la muestra (Camacho, 2015) la unidad de muestreo que se utilizó fue el punto. En cuanto al método de muestreo utilizado fue aleatorio estratificado, que permite tener el control sobre la distribución de los sitios de muestreo, garantizando que no se sobremuestren las coberturas de mayor extensión con relación a las de menor área (Mas, 2003).

Por otra parte, el tamaño de la muestra fue establecido con base en dos aspectos, el primero determinado por Congalton (1988) que sugiere verificar por lo menos 50 sitios por categoría. El segundo basado en los parámetros establecidos por Mas & Couturier (2011) quienes definen que para obtener una fiabilidad global del 80% y un medio intervalo de confianza de 5%, se deben aplicar 247 sitios de verificación. De acuerdo con lo anterior, se evaluaron 600 puntos de muestreo para los mapas correspondientes al año 2022 digitalizando 100 puntos por categoría de los ecosistemas identificados (Tabla 1). Dónde: P= Confiabilidad estimada; *= Medio intervalo de confianza.

Tabla 1. Tamaño de la muestra por categoría.

Porcentaje de fiabilidad (P*)	Categorías identificadas				
	90	80	70	60	50
%					
2.5	553	983	1291	1475	1535
5.0	138	246	323	369	384
10	35	61	81	92	96

Fuente: Mas & Couturier, (2011).

Evaluación de los sitios de verificación

Para esta etapa se correlacionaron los puntos de muestreo previamente identificados de cada ecosistema presente en la cartografía; la valoración de los sitios de verificación correspondientes a los ecosistemas presentes para el año 2022, se realizó con base en la carta de uso de suelo y vegetación del año 2015 del INEGI.

Se registraron puntos de verificación de forma estratégica, es decir se determinaron puntos en los límites cercanos a los centroides generados en la etapa anterior, con el fin de verificarlos en campo mediante el uso del GPS, y posteriormente relacionarlos con los pixeles clasificados en los mapas.

Se retomaron fuentes alternas de verificación para rectificar algunos puntos que fueron de difícil acceso en campo, esto se realizó a través de imágenes de alta resolución espacial de Google Earth para el año 2022; a continuación, se correlacionaron con los pixeles clasificados en los mapas.

Análisis de los datos

Para esta última fase de la validación se elaboró una matriz de confusión o matriz de error para el año 2022, que permite comprobar la información de los sitios de verificación en los mapas de los ecosistemas seleccionados. La matriz está integrada por filas que representan las clases de referencia; las columnas representan las categorías del mapa y la diagonal expresa el número de sitios o puntos de verificación, a través de la relación que existe entre los datos de referencia y clases del mapa, considerando que los marginales representan errores de asignación (Mas *et al.*, 2003; Mas & Couturier, 2011) [Tabla 2].

Tabla 2. Matriz de confusión expresada o error.

Verdad terreno (Clases de referencia= <i>i</i>)	Verdad imagen (Categorías del mapa = <i>j</i>)				
	<i>j</i> ₁	<i>j</i> ₂	...	<i>j</i> _q	Total
<i>i</i> ₁	<i>i</i> ₁ <i>j</i> ₁	<i>i</i> ₁ <i>j</i> ₂	...	<i>i</i> ₁ <i>j</i> _q	<i>i</i> ₁₊
<i>i</i> ₂	<i>i</i> ₂ <i>j</i> ₁	<i>i</i> ₂ <i>j</i> ₂	...	<i>i</i> ₂ <i>j</i> _q	<i>i</i> ₂₊
...
<i>i</i> _q	<i>i</i> _q <i>j</i> ₁	<i>i</i> _q <i>j</i> ₂	...	<i>i</i> _q <i>j</i> _q	<i>i</i> _{q+}
Total	+<i>j</i>₁	+<i>j</i>₂	...	+<i>j</i>_q	∑<i>i</i>₊ ∑<i>j</i>

Fuente: Mas *et al.*, (2003); Mas & Couturier, (2011).

Donde

i_j = Representa el número de puntos correctamente clasificados de cada categoría para determinar la superficie.

i_{1+} = Es la suma de los puntos correspondientes a la clase de referencia i_1 para determinar la superficie.

$+j_1$ = Corresponde a la suma de los puntos de la categoría del mapa j_1 para determinar la superficie

$\Sigma+j$ o $\Sigma i+$ = Es el total de la suma de los puntos de las clases de referencia (ΣP_{i+}), o bien, el total de la suma de los puntos correspondientes a las categorías del mapa (ΣP_{+j}).

En los resultados obtenidos mediante la matriz de cambios, se desarrolló el cálculo de los índices de fiabilidad y el medio-intervalo de confianza para los mapas 2022, considerando como mínimo una fiabilidad estimada del 80%, (Stehman y Czaplewski 1998), [Tabla 3].

Tabla 3. Ecuaciones para determinar los índices de fiabilidad y el medio-intervalo de confianza.

Indicador	Expresión matemática	Descripción
Confiabilidad global o exactitud general	$P_c = (\Sigma P_{ij} / \Sigma P_{+j} \text{ o } P_{i+}) * 100$	Es la proporción de puntos correctamente clasificados en los mapas, producto de la interpretación de la imagen de satélite para determinar la superficie.
Medio intervalo de confianza	$B = z_{\alpha/2} \sqrt{p(1-p) / n}$	Corresponde al error de la estimación precisa de la fiabilidad del mapa. Dónde: $z_{\alpha/2}$ es el valor que separa a un área de $\alpha/2$ en la cola del lado derecho de la distribución normal estándar (el valor de $z_{\alpha/2}$ en este estudio corresponde a 1.96); p es la fiabilidad esperada; y n corresponde al tamaño de la muestra.
Error de comisión	$E_c = (1 - (P_{ij} / P_{+j})) * 100$	Indica la proporción de sitios de verificación cartografiada en una cierta clase j , pero que en realidad pertenecen a otra categoría.
Error de omisión	$(E_o) = (1 - (P_{ij} / P_{i+})) * 100$	Representa la proporción de sitios de verificación correspondientes a una categoría j que fue cartografiada en otra.
Confiabilidad del usuario	$C_u = (P_{ij} / P_{+j}) * 100$	Se interpreta como la probabilidad que un sitio clasificado como j y aleatoriamente seleccionado sea realmente j en el terreno.
Confiabilidad del productor	$C_p = (P_{ij} / P_{i+}) * 100$	Es la proporción de sitios de verificación de la clase j que están representados en el mapa o en la base de datos como tal.

Fuente: Camacho *et al.*, (2015); Mas *et al.* (2003); Mas & Couturier, (2011); Stehman & Czaplewski, (1998).

Previamente al desarrollo de los índices de fiabilidad y el medio-intervalo de confianza, se realizó la corrección de las matrices de confusión, generadas por el tipo de método de muestreo que se utilizó en la investigación (aleatorio estratificado). Debido a que el número de sitios por categoría no es proporcional a la superficie representada por cada una de estas clases, se interpreta que el resultado no debe ser explicado de esta manera (Mas *et al.*, 2003).

Esta corrección se elaboró a través del método planteado por Card (1982), ponderando el número de sitios de verificación, en correlación con la superficie de cada una de las clases establecida en el mapa de los ecosistemas presentes para el año 2022. A través de este método se desarrollaron matrices de confusión expresadas en proporción (Tabla 4), y en relación con los datos que integran estas, se estimó la proporción y la superficie de cada una de las clases de análisis.

Tabla 4. Matriz de confusión expresada en proporción.

Verdad terreno (Clases de referencia = i)	Verdad imagen (Categorías del mapa = j)				Total
	j_1	j_2	...	j_q	
i_1	$P_{i_1j_1}$	$P_{i_1j_2}$...	$P_{i_1j_q}$	P_{i_1+}
i_2	$P_{i_2j_1}$	$P_{i_2j_2}$...	$P_{i_2j_q}$	P_{i_2+}
...
i_q	$P_{i_qj_1}$	$P_{i_qj_2}$...	$P_{i_qj_q}$	P_{i_q+}
Total	P_{+j_1}	P_{+j_2}	...	P_{+j_q}	$\Sigma P_{+j} \Sigma P_i$

Fuente: Mas *et al.*, (2003).

Donde

P_{ij} = Proporción de puntos correctamente clasificados de cada categoría o clase para determinar la superficie.

P_{i1+} = Es la suma de las proporciones de los puntos correspondientes a la clase de referencia i_1 para determinar la superficie.

P_{+j1} = Corresponde a la suma de las proporciones de los puntos de la categoría del mapa j_1 para determinar la superficie.

ΣP_{+j} o ΣP_{i+} = Es el total de la suma de las proporciones de los puntos de las clases de referencia (ΣP_{i+}), o bien, el total de la suma de las proporciones de los puntos correspondientes a las categorías del mapa (ΣP_{+j}).

Obtención de la cartografía de los ecosistemas forestales en el PNIMH

La cartografía de los ecosistemas presentes para el año 2022 fue generada a partir de la clasificación supervisada de la imagen de satélite con el software Arc Gis 10.2 y mediante la aplicación y validación cartográfica (Mas & Couturier, 2011).

Análisis de la fragmentación en los ecosistemas forestales del PNIMH

A partir de la identificación de los diferentes ecosistemas forestales que componen el área de estudio se procedió a calcular la fragmentación de cada ecosistema con el objetivo de tener una mayor precisión a la hora de estimar la captura de carbono.

La fragmentación se determinó con el fin de conocer la transformación de un bosque continuo en unidades más pequeñas y aisladas entre sí, cuya área resultante es mucho menor a la del bosque original (Andrén, 1994; Bustamante & Grez, 1995).

Para el desarrollo del análisis de fragmentación es importante instalar la extensión patch analyst, en el software Arc Map 10.2.2, la cual se descargó del link: http://www.cnfer.on.ca/SEP/patchanalyst/Patch5_2_Install.htm.

Posteriormente se tomaron en cuenta los siguientes indicadores:

Número de parches (NUMP): Es un indicador de varios procesos ecológicos. Adicionalmente se emplea como índice de heterogeneidad del paisaje y como base para el cálculo de otras métricas (Correa *et al.*, 2012).

Tamaño medio de parche (MPS): Es empleado como indicador de fragmentación, si se evalúa el tamaño del tipo de parche de interés (Correa *et al.*, 2012).

Índice de forma media (MSI): La forma del parche ejerce influencia en numerosos procesos inter-parches tales como migraciones de fauna. La forma de un parche está caracterizada por la longitud de sus bordes (Correa *et al.*, 2012).

Una vez definidos los indicadores necesarios, se realizarán los siguientes procesos:

Generar una malla hexagonal que cubrió la zona de estudio, a partir de la herramienta Patch/Make Hexagon Regions, tomando como base la capa con bosque (1), y no bosque (0), en donde se incluirán otras coberturas.

Generar una intersección de la malla hexagonal con la capa de bosque y no bosque: mediante la opción Analysis Tools/Overlay/ Intersect, donde se intersectaron ambas capas de información.

Con la opción de la extensión Patch/ analysis by regions, se obtuvieron los indicadores que ya fueron definidos por regiones, a través de una tabla de atributos, la cual el software ha procesado de forma interna y vinculando las dos capas de información.

Vincular la tabla de análisis espacial por regiones a la capa de bosque y no bosque con el identificador respectivo, dejando únicamente los parches que registran bosque. Una vez que se realizaron estos procesos se ejecutó una modulación de los valores de los indicadores a través de la siguiente formula:

$$\frac{\text{Valor-valor mínimo}}{\text{Valor máximo-valor mínimo}}$$

Se promediaron estos valores, y se aplicó una normalización a los datos obtenidos en rangos, para obtener los parches con mayor y menor fragmentación. Los valores de fragmentación refieren el grado de conservación de la cobertura forestal siendo los valores muy bajo y bajo los que tienen más a conservarse, mientras que los valores altos y muy altos son las zonas que tienen a cambiar de cobertura o deforestarse. Finalmente

se calculó la captura de carbono a partir de los índices de captura de carbono propuesto por Jiménez (2013) y Morfín, *et al.*, (2015) además de incluir el análisis comparativo con y sin fragmentación forestal.


RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Identificación y descripción de los ecosistemas presentes en el PNIMHC

Derivado de las interrelaciones que existen entre los componentes ambientales como el clima, hidrología, la geomorfología y el tipo de suelo, se generan las condiciones adecuadas para el desarrollo de los distintos ecosistemas presentes en el Parque, en este caso las características ambientales que presenta el ANP son favorables para el desarrollo de diversos ecosistemas (Tabla 5).

Tabla 5. Ecosistemas presentes en el PNIMH.

Ecosistema	Cobertura
<p><i>Bosque de Oyamel:</i> Este tipo de vegetación se distribuye principalmente en cumbres y laderas de montañas, cañadas o barrancas hasta los 3 mil 660 metros sobre el nivel del mar y corresponde a un bosque mono específico de oyamel (<i>Abies religiosa</i>)</p>	
<p><i>Bosque de Pino:</i> Este tipo de vegetación corresponde a una comunidad abierta, con estrato arbóreo con alturas promedio de 15 a 30 metros, los pinares tienen un estrato inferior relativamente pobre en arbustos.</p>	
<p><i>Vegetación secundaria:</i> La vegetación secundaria denominada así para esta investigación está conformada por tipos de matorral, pastizales y manchas de árboles de encino (<i>Quercus laurina</i>), encino (<i>Quercus rugosa</i>) y encino capulincillo (<i>Quercus crassipes</i>).</p>	
<p><i>Agro ecosistemas:</i> Agroecosistemas desarrollados por intervención de actividades antrópicas; son ambientes conocidos localmente como milpas. Estos espacios son utilizados principalmente para la producción y aprovechamiento agropecuario.</p>	
<p><i>Localidades urbanas:</i> Existen cuatro localidades dentro del Parque Nacional: Salazar, (municipio de Lerma); La Marquesa y el Zarco (Las Truchas), (municipio de Ocoyoacac); y La Cima, (municipio de Huixquilucan). Las cuales demandan bienes y</p>	

servicios por lo que generan presiones y cambios de uso de suelo a la masa forestal dentro del parque.	
<p>Cuerpos de agua: Entre los numerosos arroyos del Parque Nacional destaca el Arroyo Salazar, que tiene sus orígenes al este del cerro El Ángel, desciende de una altitud de 3 mil 450 metros sobre el nivel del mar.</p>	

Fuente: Elaboración propia con base en (CONANP, 2008); (CONABIO, 2018).

Validación de la cartografía de los ecosistemas forestales, año 2022

Se verificaron 600 puntos de muestreo en el mapa final para el año 2022 correspondientes a 100 puntos de verificación (verdad terreno), para cada ecosistema identificado (categorías del mapa=verdad imagen). En la matriz de confusión error para el año 2022, de los 600 puntos de verificación, 586 corresponden al ecosistema asignado; solo 14 puntos resultaron de otro ecosistema diferente al asignado. Los resultados expresan el número de sitios correctamente clasificados de cada ecosistema (categorías), de los mapas (Tabla 6).

Los resultados obtenidos en la Tabla 6, se generaron en función a la proporción de la superficie (porcentaje de las categorías clasificadas), del número total de los puntos de muestreo verificados (verdad terreno), de esta manera se consigue calcular la superficie en porcentaje de los ecosistemas de los mapas (verdad imagen).

Tabla 6. Análisis de confiabilidad de la cartografía, mediante la matriz de error.

Año 2022		Verdad imagen (Clases del mapa)						
		Bosque de pino	Bosque de oyamel	Vegetación secundaria	Agricultura	zona urbana	Cuerpo de agua	Total verdad terreno
Verdad terreno (Clases de referencia)	Bosque de pino	97	2	2	0	0	0	100
	Bosque de oyamel	2	97	0	2	1	0	100
	Vegetación secundaria	1	0	97	0	2	0	100
	Agricultura	0	1	1	98	0	0	100
	zona urbana	0	0	0	0	97	0	100
	Cuerpo de agua	0	0	0	0	0	100	100
Total verdad imagen		100	100	100	100	100	100	600

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados alcanzados mediante la matriz de confusión expresada en proporción (Tabla 7), son los siguientes: de los puntos de verificación analizados, se identificaron 14 puntos que no coinciden con las categorías del mapa, por lo que se procesaron y se generaron los ajustes necesarios, dando como resultados ajustados los siguientes porcentajes en el mapa para cada ecosistema: bosque de pino (16.6% de la superficie total); bosque de oyamel (16.6%); vegetación secundaria (16.7%), agricultura (16.6%), zona urbana y cuerpos de agua con el 16.6% respectivamente en cada ecosistema.

Tabla 7. Análisis de confiabilidad de la cartografía, mediante la matriz de error expresada en proporción.

Año 2022		Verdad imagen (Clases del mapa)						
		Bosque de pino	Bosque de oyamel	Vegetación secundaria	Agricultura	zona urbana	Cuerpo de agua	Total verdad terreno
Verdad terreno (Clases de referencia)	Bosque de pino	0.115	0.082	0.030	0	0	0	0.2
	Bosque de oyamel	0.040	0.067	0	0.001	0.012	0	0.2
	Vegetación secundaria	0.010	0	0.099	0	0.006	0	0.2
	Agricultura	0	0.016	0.036	0.164	0	0	0.2
	zona urbana	0	0	0	0	0.147	0	0.2
	Cuerpo de agua	0	0	0	0	0	0.166	0.2
Total verdad imagen		0.166	0.166	0.166	0.166	0.166	0.166	1.0
Proporción representada en el mapa		0.160	0.520	0.191	0.019	0.100	0.006	1

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 8, presenta los resultados obtenidos a través del método de Card (1982), el método pondera el número de sitios de verificación (verdad terreno), en correlación a la superficie de cada uno de los ecosistemas forestales (verdad imagen). Para el bosque de oyamel (6.6% de la superficie total); bosque de pino (13.9%); bosque mixto de pino-encino (13.4%), vegetación secundaria (28.5%); agricultura (38.4%) y cuerpos de agua (0.1%).

Tabla 8. Análisis de confiabilidad de la cartografía, mediante la matriz de error corregida de acuerdo con Card (1982).

Año 2022		Verdad imagen (Clases del mapa)						
		Bosque de oyamel	Bosque de pino	Bosque mixto de pino-encino	Vegetación secundaria	agricultura	Cuerpos de agua	Total verdad terreno
Verdad terreno (Clases de referencia)	Bosque de oyamel	0.057	0.002	0	0.001	0	0	0.060
	Bosque de pino	0.002	0.102	0	0	0.004	0	0.108
	Bosque mixto de pino-encino	0.001	0.004	0.134	0.002	0.008	0	0.150
	Vegetación secundaria	0.001	0.013	0	0.281	0.018	0	0.315
	agricultura	0.004	0.016	0	0	0.352	0	0.373

	Cuerpos de agua	0	0	0	0		0.001	0.001
Total verdad imagen		0.066	0.139	0.134	0.285	0.384	0.001	1.0
Proporción representada en el mapa		0.065	0.129	0.1339	0.285 2	0.384	0.001	1.0

Fuente: Elaboración propia.

Confiabilidad global e intervalos de confianza

Los intervalos de confianza se obtuvieron para usuarios y productores; así fue posible determinar la confiabilidad de manera global. El intervalo de confianza para los usuarios muestra la probabilidad de que las categorías clasificadas correspondan verdaderamente a lo representado en el área de estudio, mientras que el intervalo para los productores representa la proporción de sitios de verificación de todas las categorías representadas en los mapas.

La confiabilidad global representa las categorías correctamente clasificadas en los mapas. La Tabla 9, representa los resultados obtenidos de los intervalos de confianza de la confiabilidad del mapa. Se identificó una proporción del 100% (verdad imagen) para la confiabilidad del usuario en los ecosistemas bosque mixto de pino-encino y los cuerpos de agua. La vegetación secundaria obtuvo los valores más altos (99%), por lo que el error de comisión corregido es del 1%. La menor confiabilidad corresponde al ecosistema bosque de oyamel y agricultura con el 92%, por lo que el error de comisión que se calculó fue del 8%; de acuerdo con Mas (2003) el 80% es el valor límite permitido para tener valores confiables en la cartografía final.

En relación con la confiabilidad del productor, los cuerpos de agua presentan una confiabilidad del 100%, los ecosistemas que presentan los valores más altos son bosque de oyamel, vegetación secundaria y agricultura con una proporción del 95% (verdad imagen), por lo que el error de omisión corresponde al 5%; por otra parte, el ecosistema que presenta la mínima confiabilidad del productor es el bosque de pino con el 93% y el mayor nivel de error de omisión con el 4%. En general la confiabilidad global que presenta el mapa de los ecosistemas presentes en el Parque Nacional Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla es del 95.7% (verdad imagen), y 1.5% del intervalo de confianza de la confiabilidad global.

Tabla 9. Confiabilidad global y sus intervalos de confianza para los ecosistemas presentes en el área de estudio para el año 2022.

Año 2022	Bosque de oyamel	Bosque de pino	Bosque mixto de pino-encino	Vegetación secundaria	agricultura	Cuerpos de agua	Confiabilidad global (%)	Intervalo de confianza confiabilidad global (%)
Confiabilidad del usuario	92	94	100	99	92	100		
Error de comisión	8	6	0	1	8	0		

Intervalo de confianza de la confiabilidad del usuario	5.84	5.021	0.002	2.12	5.84	0	95.75	1.58
Confiabilidad del productor	95	93	94	95	95	100		
Error de omisión	5	7	6	5	5	0		
Intervalo de confianza de la confiabilidad del productor	0.047	0.048	0.069	0.046	0.047	0		

Fuente: Elaboración propia.

Ajuste a las superficies derivadas de los mapas clasificados

La Tabla 10, presenta los resultados de los valores correspondientes a la proporción corregida en relación con el resultado del ajuste de los errores de clasificación. El ecosistema vegetación secundaria requirió una mayor corrección, resultado de la presencia de errores de omisión y comisión.

Tabla 10. Superficies obtenidas de la clasificación, superficies corregidas por el método de Card de la superficie corregida para cada ecosistema

Año 2022		Bosque de oyamel	Bosque de pino	Bosque mixto de pino-encino	Vegetación secundaria	agricultura	Cuerpos de agua	Superficie (ha)	Proporción corregida	Superficie corregida (ha)
Sitios de muestreo (Clases de referencia)	Bosque de oyamel	0.977	0.017	0	0.004	0	0	953	0.060	933
	Bosque de pino	0.038	0.948	0	0	0.012	0	1894	0.108	1885
	Bosque mixto de pino-encino	0.019	0.033	0.920	0.006	0.019	0	1958	0.150	1984
	Vegetación secundaria	0.021	0.091	0	0.845	0.042	0	4169	0.315	4174
	Agricultura	0.056	0.113	0	0	0.829	0	5623	0.373	5621
	Cuerpos de agua	0	0	0	0	0	1	18	0.001	18
Proporción representada en el mapa		0.065	0.129	0.133	0.285	0.38	0.001	1461	1.0	1461

Fuente: Elaboración propia.

Superficie y distribución ajustada y validada de los ecosistemas presentes en el Parque Nacional Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla

El Parque Nacional Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla presenta para el año de 2022 una superficie de 1,889 hectáreas distribuidas en seis distintos ecosistemas (Tabla 11). El bosque de oyamel cuenta con una superficie de 984 hectáreas, es el de mayor proporción forestal (52.1%), y se distribuye principalmente en la zona centro del ANP.

Tabla 11. Superficie de los ecosistemas presentes en el PNIMHC.

No	Ecosistema	Superficie (ha)	(%)
1	Bosque de oyamel	984	52.1
2	Bosque de pino	304	16.1
3	Vegetación secundaria	362	19.2
4	Agricultura	36	1.9
5	Zona urbana	190	10.1
6	Cuerpo de agua	13	0.7
	Total	1889	100

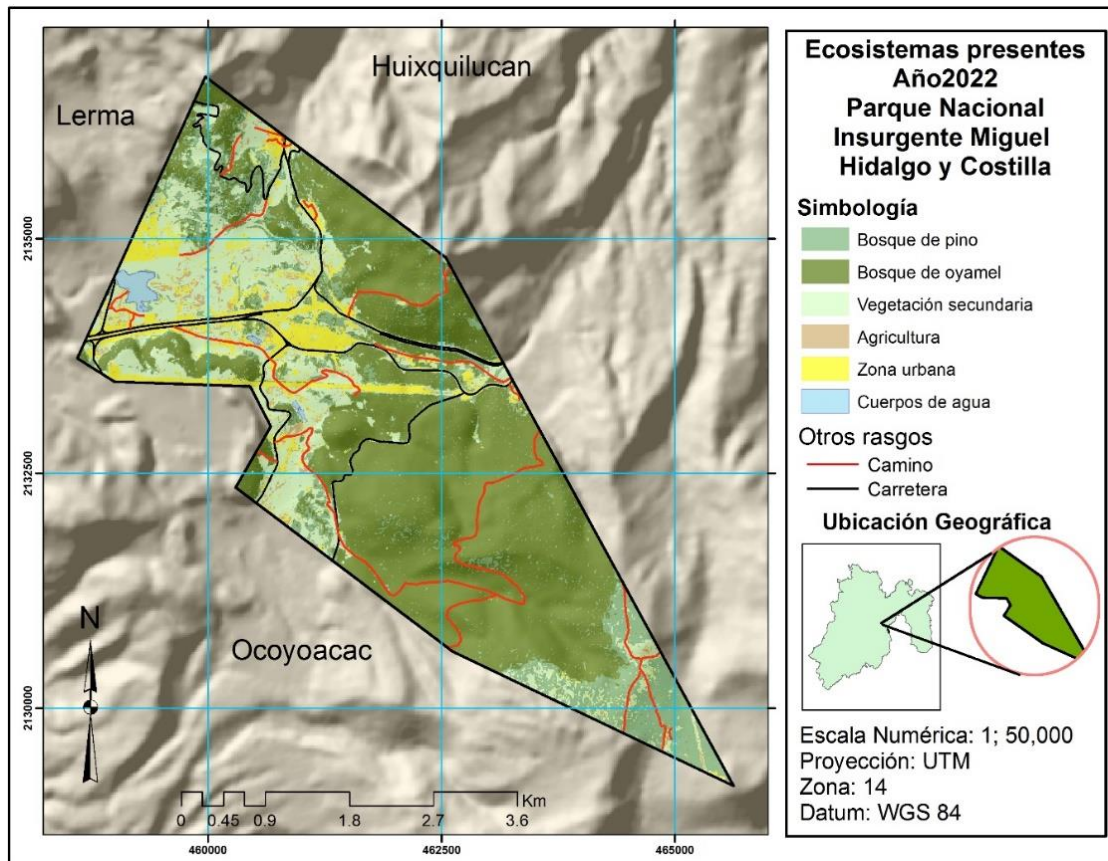
Fuente: Elaboración propia.

El ecosistema forestal bosque de pino cuenta con una superficie de 304 hectáreas equivalente al 16.1% está distribuido en la zona oeste y norte del área de estudio entre las altitudes que van de los 2,400 a los 2,700 msnm, el tercer ecosistema es la vegetación secundaria con 362 hectáreas (19.2%), distribuido la mayor parte en la zona norte.

En orden de superficie el cuarto ecosistema es la agricultura que cuenta con una superficie de 36 hectáreas (1.9%), es el de menor extensión territorial distribuida en la zona centro y norte del ANP.

La zona urbana se encuentra distribuido en la zona norte donde existe las aglomeraciones más densas y cuenta con una superficie de 190 hectáreas equivalentes a (10.1%), el ecosistema natural con menor extensión son los cuerpos con 13 hectáreas equivalentes a (0.7%) del total de la superficie, el afluente de mayor superficie se encuentra en la zona sur como se muestra en la Figura 2.

Figura 2. Ecosistemas presentes en el PNIMHC



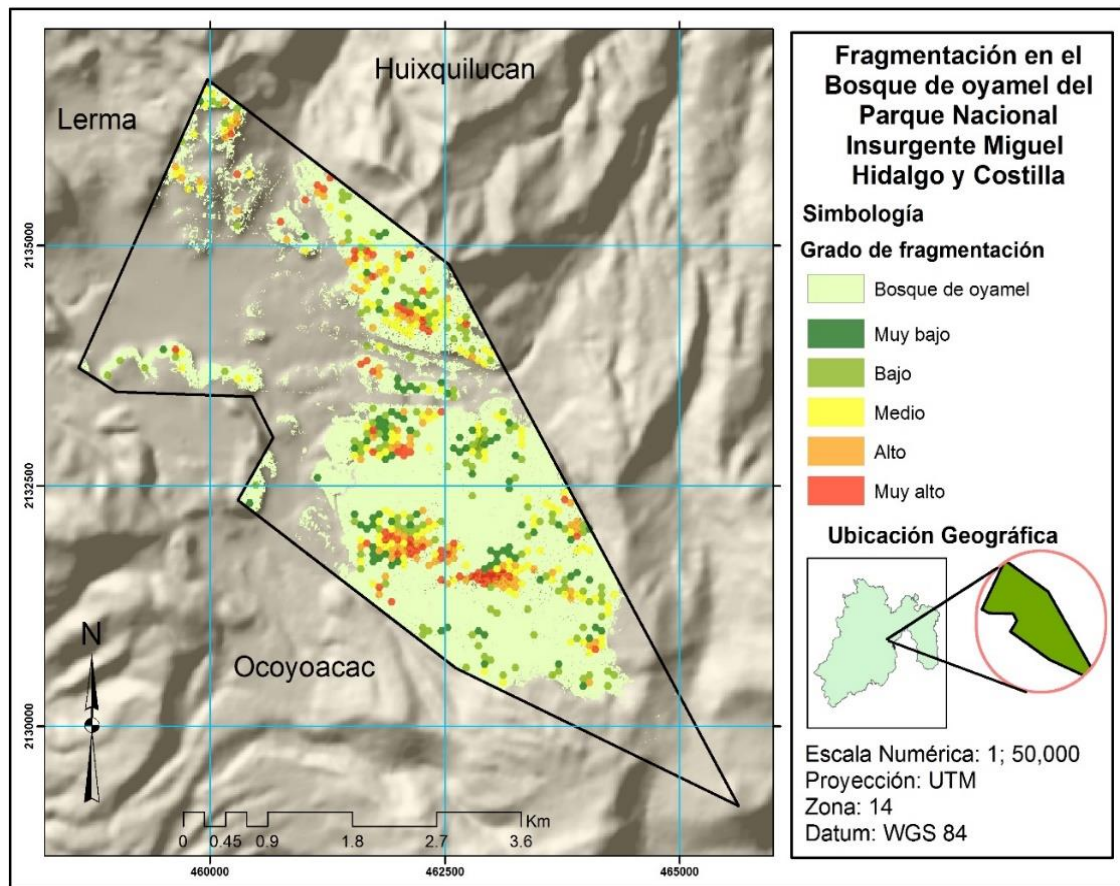
Fuente: Elaboración propia.

Análisis de la fragmentación en los ecosistemas forestales del Parque Nacional Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla

Se elaboró cartografía del grado de fragmentación de los ecosistemas forestales bosque de oyamel y bosque de pino del Parque Nacional Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla del año 2022. En el caso del bosque de oyamel la leyenda corresponde a cinco categorías, que en la suma de todas estas encontramos un total de 522 polígonos, de los cuales se encuentran divididos en las siguientes clases: Muy bajo (91), Bajo (135), Medio (148), Alto (84) y Muy alto (64).

Los polígonos referentes a los valores más altos de fragmentación se concentran en la zona sur del parque, que corresponde a las áreas donde se desarrollan múltiples actividades recreativas y turísticas como los paseos a caballo y carreras de motos, entre otras (Figura 3).

Figura 3. Fragmentación en el ecosistema forestal de oyamel del PNIMHC.

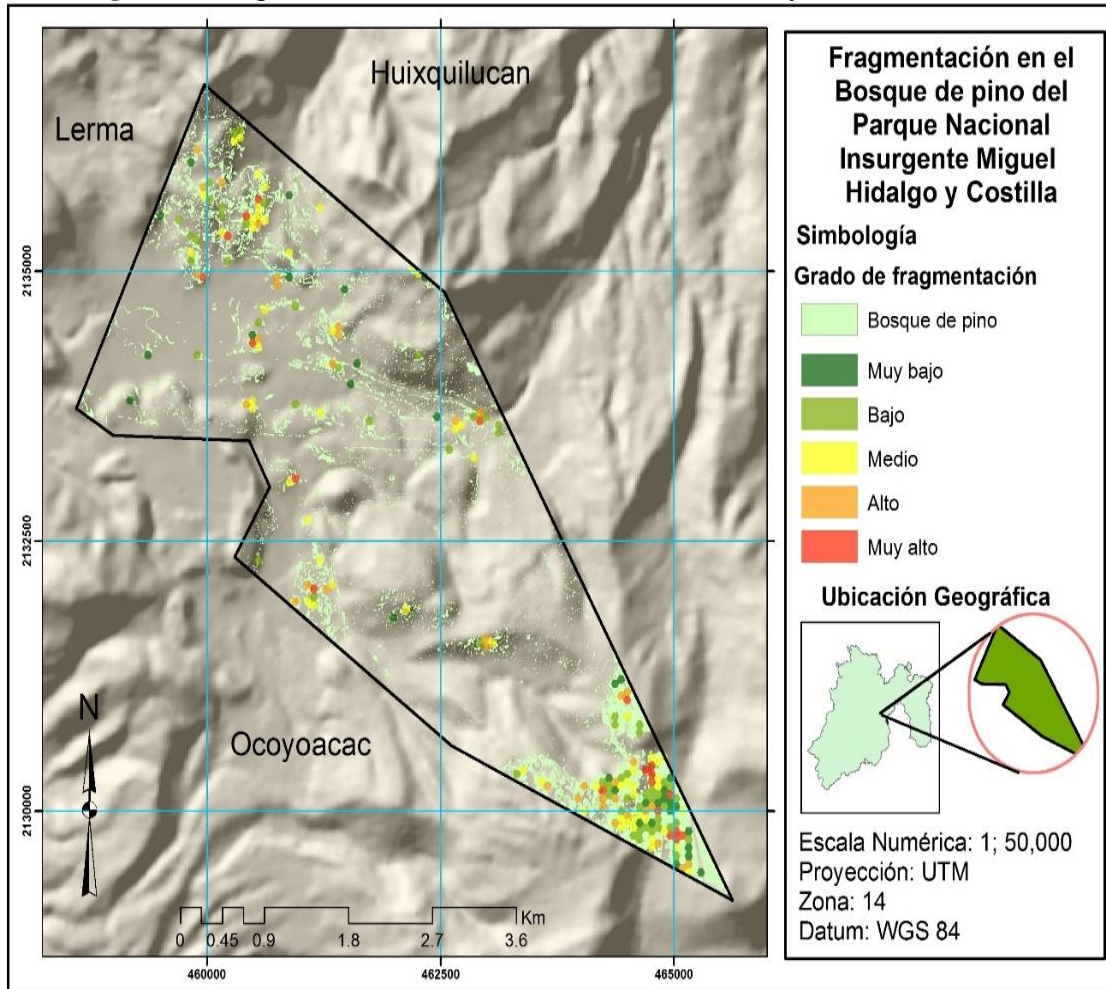


Fuente: Elaboración propia.

En el caso del bosque de pino se determinaron cinco categorías, con un total de 210 polígonos, los cuales se encuentran divididos en los siguientes rangos: muy bajo (32), bajo (60), medio (61), alto (36) y muy alto (21).

Los polígonos referentes a los valores más altos de fragmentación se concentran en la zona sur del parque, lo que corresponde a las áreas donde se presentan las pendientes más bajas, lo que favorece el desarrollo de actividades agrícolas y aumenta el cambio de uso de suelo (Figura 4).

Figura 4. Fragmentación en el ecosistema forestal de oyamel del PNIMHC



Fuente: Elaboración propia.

Captura de carbono en los ecosistemas forestales del Parque Nacional Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla

La captura de carbono se calculó por ecosistema forestal para el año 2022, se realizó a partir de los índices de captura de carbono propuesto por Jiménez (2013) y Morfín *et al.*, (2015). El carbono capturado se calculó al multiplicar el índice de captura por la superficie de cada ecosistema forestal, lo que se hizo antes y después del cálculo de la fragmentación forestal, con el fin de comparar el carbono capturado antes y después.

El Parque Nacional Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla presenta dos tipos de ecosistemas forestales el bosque de oyamel y el bosque de pino; en el bosque de oyamel, al realizar el análisis de fragmentación la superficie real de este bosque disminuyó 225 ha (22.8%), por lo que la captura de carbono para el año 2022 disminuyó en 106.42 ton. En el bosque de pino al realizar el análisis de fragmentación la superficie real de este bosque disminuyó en 74.5 ha (24.5%), por lo que la captura de carbono para el año 2022 disminuyó en 34.8 ton (Tabla 12).

Tabla 12. Captura de carbono en los ecosistemas forestales del PNIMHC

No	Ecosistema	Superficie (ha) Sin análisis de fragmentación	Superficie (ha) Con análisis de fragmentación	Índice de captura carbono	Carbono capturado (ton) Sin análisis de fragmentación	Carbono capturado (ton) Con análisis de fragmentación
1	Bosque de oyamel	984	759	0.473	465.92	359.38
2	Bosque de pino	304	229.5	0.468	142.48	107.56

Fuente: Elaboración propia.

La fragmentación forestal permitió realizar un análisis comparativo a mayor detalle, y calcular con mayor precisión tanto la superficie real de cada ecosistema forestal, como la cantidad de carbono capturado en cada tipo de bosque. Es posible observar que para ambos ecosistemas la superficie forestal disminuye entre el 20 y el 25% al realizar el análisis de fragmentación, lo que afecta en igual proporción el cálculo de la captura de carbono (Tabla 12).

CONCLUSIONES

El estudio realizado sobre el grado de fragmentación en los ecosistemas forestales del parque permitió conocer a detalle cuáles son los bosques y las zonas con menor densidad forestal. De acuerdo con el análisis realizado a partir de la cartografía generada, indica que la concentración de polígonos con los valores más altos de fragmentación se encuentra en la zona sur del parque en el municipio de Ocoyoacac, Estado de México, donde se desarrollan múltiples actividades turísticas lo que repercute directamente en el desarrollo de los bosques.

Los valores de fragmentación refieren el grado de conservación de la cobertura forestal siendo los valores muy bajo y bajo los que tienen más a conservarse, estos se observan en las zonas suroeste y centro oeste. Por otra parte, los valores medios son aquellos que pueden sufrir cambios menores hacia la pérdida de densidad y se sitúan en las zonas centro y centro oeste; mientras que los valores altos y muy altos son las zonas que tienen a cambiar de cobertura o deforestarse se identifican en la zona sur del área de estudio. Estos procesos de fragmentación repercuten en el cálculo de captura de carbono.

La fragmentación forestal es fundamental en estudios sobre transformaciones de los ecosistemas forestales, ya que favorece la identificación de áreas prioritarias de atención, a una escala detallada y a un análisis más real del territorio. A partir de ello, será posible realizar estudios posteriores que permitan implementar actividades de manejo a fin de minimizar los impactos negativos, de acuerdo y para el cuidado de la cobertura forestal.

BIBLIOGRAFÍA

Bonilla, J. R. & Novelo, R. A. (1995). Manual de identificación de plantas acuáticas del Parque Nacional Lagunas de Zempoala, México. *Cuadernos IBUNAM. Instituto de Biología*. 168 p.

Camacho, J.; Juan, J. I., Pineda, N. B.; Cadena, E. G.; Bravo, L. C. & Sánchez, M. (2015). Cambios de cobertura/uso del suelo en una porción de la Zona de Transición Mexicana de Montaña. *Madera y Bosques*. 21(1), 93-112.

Card, H. D. (1982). Using known map category marginal frequencies to improve estimates of thematic map accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 48(3), 431-439.

CONANP, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, (2008). Programa de Conservación y Manejo. Parque Nacional Lagunas de Zempoala., México.

CONABIO. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2018). Bosques templados de México. Obtenido el 25 agosto de 2020 de <https://www.conabio.gob.mx/bosqueTemplado>

Congalton, R. (1988). A comparison of sampling scheme use in generating error matrices for assessing the accuracy of maps generated from remotely sensed data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(5), 593-600.

ECCAP-CONANP. (2015). Estrategia de Cambio Climático desde las Áreas Naturales: Protegidas: Una convocatoria para la resiliencia de México 2015-2020. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2015). Obtenido el 14 mayo de 2020 de <https://www.inegi.org.mx/temas/mapas/ususuelo/>

Jensen, J. (1996). *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective (2a. ed.)*. NJ: Prentice – Hall. Upper Saddle River

Martínez, T.; Angulo, C. & Olvera, G. (2010). Pérdida de la cobertura forestal en el ANP Lagunas de Zempoala. *Estudios Geográficos de Análisis Territorial y Ambiental*, 2-12. 52.

Mas, J.; Reyes, J. & Pérez, A. (2003). Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: una revisión. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, (51), 53-72.

Mas, J. & Couturier S. (2011). *Evaluación de Bases de Datos Cartográficas*. In F. Bautista (Ed.), *Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales (2da. ed., pp. 675-703)*. México: Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental y el Instituto de Geografía.

Jiménez, E. (2013). Ecuaciones Alométricas para Estimación de Biomasa Aérea en *Prosopis laevigata* Willd. y *Pinus pinceana* Gordon. Tesis Profesional. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. México. 35 p.

Morfín, R. *et al.*, (2015). Estimación de las reservas de carbono en la biomasa forestal en México. *Fortalecimiento de la preparación REDD+ en México y fomento de la cooperación Sur-Sur Comisión Nacional Forestal*, Zapopan, Jalisco, México.

Pontius, R. G. Jr., E. Shusas & M. McEachern (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, (101), 251–268.

Rejas, J. (2008). Tratamiento digital previo de las imágenes. Obtenido el 28 mayo de 2020 de http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45518/componente45516.pdf

Toro, N.; Gomariz, F.; Cánovas, F & Sierra, F. (2015). Comparación de métodos de clasificación de imágenes de satélite en la cuenca del Río Argos (Región de Murcia). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (67), 327-347

Stehman, S. & Czaplewski, R. (1998). Design and analysis for thematic map accuracy assessment fundamental principles. *Remote Sensing of Environment*. 64:331-334.

© Santiago Medina Silva, Jesús Gutiérrez Cedillo, Miguel Balderas Plata e Isabel Juan Pérez.

Medina Silva, S.; Gutiérrez Cedillo, J.; Balderas Plata, M.; Pérez, J. (2023). Fragmentación forestal y captura de carbono en un Parque Nacional del Estado de México. *Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GeoSIG)*. 15(27) Sección I:1-21

On-line: www.revistageosig.wixsite.com/geosig

Recibido: 28 de junio de 2023

Aceptado: 8 de octubre de 2023