

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 13, Número 21, 2021, Sección I: Artículos. pp. 1-23

LOS ECOSISTEMAS FORESTALES EN EL PARQUE NACIONAL LAGUNAS DE ZEMPOALA. EVOLUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL.

**Santiago Juan Medina Silva – Marisol de la Cruz Jasso – Miguel Ángel Balderas
Plata – Jesús Gastón Gutiérrez Cedillo**

Universidad Autónoma del Estado de México.

santi040695@gmail.com

RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo realizar un análisis espacio-temporal de los cambios en los ecosistemas forestales del Área Natural Protegida (ANP) Parque Nacional Lagunas de Zempoala durante los años 2010-2019, mediante la aplicación de herramientas de percepción remota en sistemas de información geográfica y clasificación de imágenes de satélite. En el parque existe un incremento en la degradación de los ecosistemas forestales derivado de la tala ilegal, que se traduce en problemáticas ambientales como alteraciones en la captura de carbono, afectando directamente la calidad de vida de las personas al reducir proporcionalmente la generación de oxígeno. Los resultados obtenidos consisten en la representación cartográfica de ambos años y la estimación de superficies de los diferentes ecosistemas; se identificó que los ecosistemas con mayor impacto son el bosque de oyamel y bosque de pino. Existe una transición marcada, ya que la pérdida de los ecosistemas forestales se deriva de la apertura de nuevas áreas agrícolas, que a su vez se desarrollan a partir de zonas deforestadas, principalmente en las zonas norte y este del área de estudio donde se presentan las menores pendientes y cuenta con mejores vías de acceso.

Palabras clave: Análisis espacio-temporal, Degradación ambiental, Ecosistemas forestales, Lagunas de Zempoala, Validación de cartografía.

ABSTRACT

The present study aims to carry out a spatio-temporal analysis of the changes in the forest ecosystems of the Natural Protected Area (ANP) Lagunas de Zempoala National Park during the years 2010-2019, through the application of remote sensing tools in geographic information systems and satellite images classification. In the park there is an increase in the degradation of forest ecosystems derived from illegal logging, which translates into environmental problems such as alterations in carbon capture, directly affecting the quality of life of people, by proportionally reducing the oxygen generation.

The obtained results consist on the cartographic representation for both years, and the estimation of surfaces of the different ecosystems; It was identified that the ecosystems with the greatest impact are the oyamel forest and pine forest. There is a marked transition, as the loss of forest ecosystems is derived from the aperture of new agricultural areas that in turn develop from deforested areas, mainly in the north and east of the study area where there are presents the smallest slopes and has better routes of access.

Keywords: Spatio-temporal analysis, Environmental degradation, Forest ecosystems, Lagunas de Zempoala, Mapping validation.

INTRODUCCIÓN

El impacto negativo a los ecosistemas forestales por la sobreexplotación de los recursos naturales es una problemática a nivel mundial, en México es alarmante el grado de pérdida de ecosistemas forestales dentro de Áreas Naturales Protegidas, a pesar de que existen instituciones encargadas para la protección de estos espacios los resultados no han sido los esperados (Sahagún y Reyes, 2018).

En la última década la problemática de la tala ilegal se ha incrementado en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala, considerada dentro de las nueve zonas críticas de ingobernabilidad en México, identificadas por la Procuraduría Federal del Protección al Ambiente (PROFEPA) para la atención de la tala clandestina, a pesar de contar con la distinción más alta de las ANP al ser decretado Parque Nacional Lagunas de Zempoala desde el 27 de noviembre de 1936 (Martínez *et al.*, 2010).

En el Parque Nacional Lagunas de Zempoala (PNLZ) el deterioro y degradación ambiental de los ecosistemas forestales es evidente, generado principalmente por tala ilegal y presencia de nuevas zonas agrícolas, repercutiendo directa e indirectamente a otros ciclos naturales provocando una serie de dificultades como la disminución de infiltración y recarga de los mantos freáticos de la región.

Para la Comisión Estatal de Agua y Medio Ambiente del Estado de Morelos las problemáticas ambientales existentes en el PNLZ se pueden resolver por vía de normas, reglamentos y vigilancia, sin embargo, existen pocas publicaciones científicas que muestren, evidencien o evalúen el grado de impacto ambiental derivado por actividades antrópicas en el área de estudio. En este sentido, es fundamental seguir con el estudio de los cambios en los ecosistemas forestales por diversas particularidades, principalmente porque es la base de una gran biodiversidad de flora y fauna; conformada por bosques de coníferas (pinos-oyamel), bosques mixtos de pino-encino, pastizales y vegetación acuática, además su biodiversidad alcanza 946 especies registradas; entre las que sobresalen la gran diversidad de los hongos y fauna acuática, (Bonilla y Novelo, 1995).

La implementación de herramientas de percepción remota es fundamental en estudios de cambios de usos del suelo, permitiendo un análisis más completo y detallado ya que comprueba la fiabilidad de un producto cartográfico, lo que permite a los interesados tomar decisiones con base en dichos productos (Mas *et al.*, 2003).

Con base a lo descrito previamente, fue necesario analizar los cambios en los ecosistemas forestales mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG)

identificando con mayor precisión las zonas prioritarias de atención, sin dejar de lado la confiabilidad de los datos. Por su parte, los resultados pueden ser considerados para la toma de decisiones en el ámbito gubernamental y público.

MATERIALES Y MÉTODOS

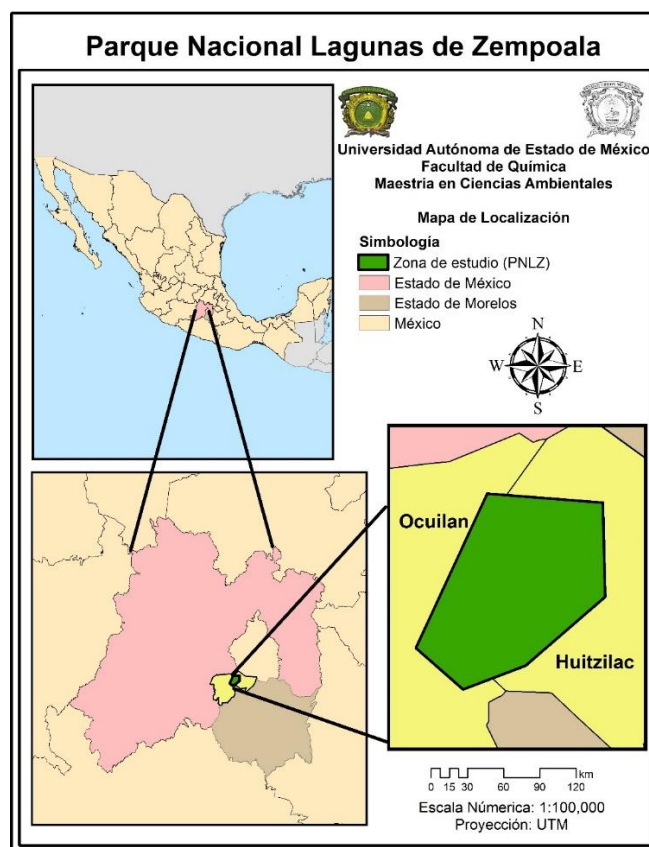
Materiales

Los materiales utilizados para la elaboración del análisis espacio temporal de los ecosistemas forestales en los años 2010 y 2019 en el PNLZ fueron las imágenes de satélite de los sensores Spot 5 con fecha de 16 de enero del año 2010 y Sentinel-2 con fecha del 12 de febrero del año 2019. Estas imágenes fueron descargadas del servidor digital Earth Explorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos USGS (2019). Por otra parte, para la edición cartográfica se obtuvieron datos vectoriales de la plataforma digital del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2015).

Área de estudio

De acuerdo con la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas CONANP, (2008) el Área Natural Protegida “Parque Nacional Lagunas de Zempoala” se ubica dentro de los municipios de Ocuilán, Estado de México y Huitzilac, Estado de Morelos (Figura N° 1), cuenta con una superficie de 4,790 hectáreas ubicadas en altitudes comprendidas entre los 2400 a 2 800 msnm, geográficamente se ubica entre las coordenadas 19°06'03"- 19°01'28" de latitud Norte y; los 99°16'33"- 99°20'53" de longitud Oeste.

Figura 1. Localización del Parque Nacional Lagunas de Zempoala.



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

Caracterización de los ecosistemas presentes en el PNLZ (2010 y 2019)

Identificación y descripción de los ecosistemas

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 Lagunas de Zempoala. La identificación de los ecosistemas se realizó con base en la carta de uso de suelo y vegetación del año 1976 (INEGI, 2015).

Las etapas para la identificación de los cambios de uso de suelo consistieron en preclasificación, clasificación de imágenes de satélite y validación de resultados.

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 para el año 2010 (bandas 3-2-1), 3 (visible rojo), 2 (visible verde), 1 (visible azul). Para el año 2019 (bandas 4-3-2), 4 (visible rojo), 3 (visible verde), 2 (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 50 campos para cada una de las categorías, es decir para el año 2010 y 2019 se digitalizaron un total de 400 puntos, de los cuales 50 corresponden al bosque mixto de pino oyamel, 50 al bosque de oyamel, 50 al bosque de pino, 50 al pastizal, 50 al bosque mixto de pino encino, 50 a la vegetación secundaria, 50 a la agricultura y 50 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 al tipo de pixel que presenta reflectancia de un color del pixel 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 generaron los mapas de los ecosistemas forestales en el PNLZ de los años 2010 y 2019.

Validación de la cartografía de los ecosistemas forestales de los años 2010 y 2019

Los datos obtenidos sobre la superficie de cada ecosistema identificado (mapas de los ecosistemas presentes en los años 2010 y 2019) 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).

a) 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 sobre-muestren las coberturas de mayor extensión en relación a las de menor área (Mas, 2003).

De acuerdo con Mas (2003), el diseño de muestreo contempla la determinación del tipo de unidades de muestreo, el método de selección de las mismas, así como el número de unidades de muestreo necesarias (tamaño de muestra).

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 y 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 a lo anterior, se evaluaron 400 puntos de muestreo para los mapas correspondientes a los años 2010 y 2019, digitalizando 50 puntos por categoría de los ecosistemas identificados para los dos años, (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 y Couturier (2011)

b) Evaluación de los sitios de verificación: Para esta etapa se correlacionaron los puntos de muestreo previamente identificados de cada ecosistema presente en los dos mapas generados; la valoración de los sitios de verificación correspondientes a los ecosistemas en los años 2010 y 2019 se realizó con base en la carta de uso de suelo y vegetación del año 1976 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 píxeles 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 los años 2010 y 2019; a continuación se correlacionaron con los píxeles clasificados en los mapas.

c) Análisis de los datos: Para esta última fase de la validación se elaboró una matriz de confusión o matriz de error para los años 2010 y 2019, 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 y Couturier, 2011) [Tabla 2].

Tabla 2. Matriz de confusión expresada o error.

Verdad terreno (Clases de referencia= i)	Verdad imagen (Categorías del mapa = j)				Total
	j_1	j_2	...	j_q	
i_1	$i_1 j_1$	$i_1 j_2$	...	$i_1 j_q$	i_{1+}
i_2	$i_2 j_1$	$i_2 j_2$	...	$i_2 j_q$	i_{2+}
...
i_q	$i_q j_1$	$i_q j_2$	...	$i_q j_q$	i_{q+}
Total	$+j_1$	$+j_2$	...	$+j_q$	$\sum i_+ \sum +j$

Fuente: Mas *et al.*, (2003); Mas y Couturie (2011).

Donde:

ij = Representa el número de puntos (superficie) correctamente clasificados de cada categoría.

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

$+j_1$ = Corresponde a la suma de los puntos (superficie) de la categoría del mapa j_1 .

$\Sigma+j$ o Σi_+ = 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 cada uno de los mapas

de 2010 y 2019, 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	$P_c = (\sum P_{ij} / \sum P_{+j} \text{ o } P_{i+}) * 100$	Es la proporción de puntos (superficie) correctamente clasificados en los mapas, producto de la interpretación de la imagen de satélite.
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 y Couturier (2011); Stehman y 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 cada año. 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 (superficie) correctamente clasificados de cada categoría o clase.

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

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

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 los mapas de los ecosistemas forestales en el PNLZ

Los mapas de los ecosistemas presentes los años 2010 y 2019 fueron generados a partir de la clasificación supervisada de imágenes de satélite (años 2010 y 2019) con el software Arc Gis 10.2 y mediante la aplicación y validación cartográfica (Mas y Couturier, 2011).

Análisis de los cambios en los ecosistemas forestales del PNLZ mediante la Matriz de tabulación cruzada

Se realizó un análisis de los procesos de cambio que se presentaron en los ecosistemas forestales en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala, mediante la construcción de una matriz de cambios o tabulación cruzada propuesta por Pontius *et al.* (2004). La matriz se construyó con los resultados obtenidos de los mapas de los ecosistemas presentes en los años 2010 y 2019.

La Tabla 5 representa la matriz de cambios, que es una tabla bidimensional donde las columnas representan el área de las categorías cartografiadas en el mapa

correspondiente a la fecha 1 (f_1). Por su parte, las filas contienen la superficie de las categorías de la fecha 2 (f_2). La diagonal principal representa la persistencia, que es el área conservada de cada una de las categorías durante el periodo de análisis (f_1 y f_2), (Pontius *et al.*, 2004).

Tabla 5. Matriz de cambios o tabulación cruzada.

		Fecha 1 (f_1)				Total (f_2)
		Categoría 1 (f_1)	Categoría 2 (f_1)	Categoría 3 (f_1)	Categoría n (f_1)	
Fecha 2 (f_2)	Categoría 1 (f_2)	Categoría 1 (f_1) Categoría 1 (f_2)	Categoría 2 (f_1) Categoría 1 (f_2)	Categoría 3 (f_1) Categoría 1 (f_2)	Categoría n (f_1) Categoría 1 (f_2)	Total Categoría 1 (f_2)
	Categoría 2 (f_2)	Categoría 1 (f_1) Categoría 2 (f_2)	Categoría 2 (f_1) Categoría 2 (f_2)	Categoría 3 (f_1) Categoría 2 (f_2)	Categoría n (f_1) Categoría 2 (f_2)	Total Categoría 2 (f_2)
	Categoría 3 (f_2)	Categoría 1 (f_1) Categoría 3 (f_2)	Categoría 2 (f_1) Categoría 3 (f_2)	Categoría 3 (f_1) Categoría 3 (f_2)	Categoría n (f_1) Categoría 3 (f_2)	Total Categoría 3 (f_2)
	Categoría n (f_2)	Categoría 1 (f_1) Categoría n (f_2)	Categoría 2 (f_1) Categoría n (f_2)	Categoría 3 (f_1) Categoría n (f_2)	Categoría n (f_1) Categoría n (f_2)	Total Categoría n (f_2)
	Total (f_1)	Total Categoría 1 (f_1)	Total Categoría 2 (f_1)	Total Categoría 3 (f_1)	Total Categoría n (f_1)	SUMA DE LOS TOTALES


Fuente: Pontius *et al.*, (2004).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Identificación y descripción de los ecosistemas

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 6].

Tabla 6. Ecosistemas presentes en el PNLZ.

ECOSISTEMA	COBERTURA
<p>1) Bosque mixto de Pino Oyamel: Se desarrollan en un promedio altitudinal que va de los 2,000 a los 3,400 msnm, en climas subhúmedos a templado húmedos donde la precipitación anual fluctúa entre 600 y 1,000 mm.</p>	

<p>2) Bosque de Oyamel: Se desarrollan entre altitudes que van de los 2400 a los 3600 msnm, son representativos de climas fríos y crecen en suelos de origen volcánico.</p>	
<p>3) Bosque de Pino: Se desarrollan entre los 2,400 y 3,800 msnm, donde las condiciones climáticas presentan temperaturas media anual entre 5 °C y 12 °C y los niveles de precipitación anual fluctúan de 1,000 a 1,200 mm.</p>	
<p>4) Bosque mixto de Pino Encino: Se ubican distribuidos en vecindad inmediata al ecosistema de pino; en segmentos se observa la dominancia de pino. Este tipo de bosque puede formar masas puras, pero es frecuente encontrarlo mixto.</p>	
<p>5) Pastizal: Son pastizales predominantes de zacatonal o pastizal subalpino, se desarrollan por arriba de los 2,800 msnm, y están formados principalmente por especies que crecen en extensas macollas de la familia Poaceae.</p>	
<p>6) Vegetación Secundaria: Son ecosistemas conformados por diversos tipos de matorrales dentro de los que destaca el matorral inerme; están constituidos principalmente por individuos con las características del matorral desértico micrófilo.</p>	
<p>7) Agricultura: 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>8) Cuerpos de agua: Están compuestos por cuencas de tipo lacustre y endorreica con condiciones hidrológicas estáticas, con escasa circulación de la masa de agua.</p>	

Fuente: Elaboración del autor con base en (CONANP, 2008) y (CONABIO, 2018).

Validación de la cartografía de los ecosistemas forestales de los años 2010 y 2019

Los resultados obtenidos mediante la validación de los mapas de los ecosistemas presentes en el área de estudio se presentan a continuación.

Se verificaron 400 puntos de muestreo para cada año (2010 y 2019), correspondientes a 50 puntos de verificación (verdad terreno) para cada ecosistema identificado (categorías del mapa=verdad imagen). En la matriz de confusión error para el año 2010, de los 400 puntos de verificación, 388 corresponden al ecosistema asignado; solo 12 puntos resultaron de otro ecosistema diferente al asignado. En el año 2019 de los 400 puntos de verificación, 389 corresponden al ecosistema asignado y 11 puntos fueron de otro ecosistema diferente al asignado (Tabla 7).

Los resultados expresan el número de sitios correctamente clasificados de cada ecosistema (categorías) de los mapas.

Tabla 7. Análisis de confiabilidad de la cartografía, mediante la matriz de error para los años para años 2010 y 2019.

Año 2010		Categorías del mapa (verdad imagen)								Total de puntos verificados (verdad terreno)
		Cuerpos de agua	Pastizal	Bosque de Oyamel	Bosque de Pino	Bosque de Pino Encino	Bosque de Pino Oyamel	Vegetación Secundaria	Agricultura	
Verdad terreno (Categorías de referencia)	Cuerpos de agua	50	0	0	0	0	0	0	0	50
	Pastizal	0	47	2	0	0	0	0	0	50
	Bosque de Oyamel	0	1	48	1	0	0	0	0	50
	Bosque de Pino	0	0	0	47	2	0	1	0	50
	Bosque de Pino Encino	0	0	0	0	49	1	0	0	50
	Bosque de Pino Oyamel	0	1	0	1	0	48	0	0	50
	Vegetación Secundaria	0	0	0	0	0	0	50	0	50
	Agricultura	0	0	0	0	0	0	1	49	50
Total categorías del mapa		50	49	50	49	51	49	52	49	400
Año 2019		Categorías del mapa (verdad imagen)								Total de puntos verificados (verdad terreno)
		Cuerpos de agua	Pastizal	Bosque de Oyamel	Bosque de Pino	Bosque de Pino Encino	Bosque de Pino Oyamel	Vegetación Secundaria	Agricultura	
Verdad terreno (Categorías de referencia)	Cuerpos de agua	50	0	0	0	0	0	0	0	50
	Pastizal	0	48	1	1	0	0	0	0	50
	Bosque de Oyamel	0	1	49	0	0	0	0	0	50
	Bosque de pino	0	0	0	48	1	1	0	0	50
	Bosque de Pino Encino	0	0	0	0	49	1	0	0	50

Bosque de Pino Oyamel	0	0	0	1	1	48	0	0	50
Vegetación Secundaria	0	1	0	0	0	0	49	0	50
Agricultura	0	0	0	0	0	0	2	48	50
Total categorías del mapa	50	50	50	50	51	50	51	48	400

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos de la tabla anterior 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).

Los resultados alcanzados mediante las matrices de confusión expresada en proporción (Tabla 8), son los siguientes:

1. Para el año 2010, de los puntos de verificación analizados, sólo 2 ecosistemas (cuerpos de agua y vegetación secundaria) coincidían al 100% con las categorías del mapa, por lo que se realizaron los ajustes necesarios dando como resultado ajustados los siguientes porcentajes en el mapa para cada ecosistema: cuerpos de agua (0.3% de la superficie total); pastizal (3.4%); bosque de oyamel (30.9%); bosque de pino (13%); bosque mixto de pino encino (1.5%); bosque mixto de pino oyamel (48.9%); Vegetación secundaria (1.5%); agricultura (0.4% de la superficie total).
2. Para el año 2019, de los puntos de verificación analizados sólo 1 ecosistema (cuerpos de agua) coincidía al 100% con las categorías del mapa, de igual forma se realizaron los ajustes necesarios dando como resultado ajustados los siguientes porcentajes en el mapa por cada ecosistema: cuerpos de agua (0.3% de la superficie total); pastizal (4.3%); bosque de oyamel (30.4%); bosque de pino (12.9%); bosque mixto de pino encino (1.5%); bosque mixto de pino oyamel (48.8%); Vegetación secundaria (1.3%); agricultura (0.5% de la superficie total).

Tabla 8. Análisis de confiabilidad de la cartografía, mediante la matriz de error para los años 2010 y 2019 expresada en proporción.

Año 2010		Categorías del mapa (verdad imagen)								Total de puntos verificados (verdad terreno)
		Cuerpos de agua	Pastizal	Bosque de Oyamel	Bosque de Pino	Bosque de Pino Encino	Bosque de Pino Oyamel	Vegetación Secundaria	Agricultura	
Verdad terreno (Categorías de referencia)	Cuerpos de agua	0.125	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.125
	Pastizal	0.000	0.118	0.003	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.125
	Bosque de Oyamel	0.000	0.022	0.092	0.011	0.000	0.000	0.000	0.000	0.125
	Bosque de Pino	0.000	0.000	0.000	0.098	0.021	0.000	0.007	0.000	0.125
	Bosque de Pino Encino	0.000	0.000	0.000	0.000	0.124	0.001	0.000	0.000	0.125
	Bosque de	0.000	0.017	0.000	0.017	0.000	0.091	0.000	0.000	0.125

	Pino Oyamel									
	Vegetación Secundaria	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.125	0.000	0.125
	Agricultura	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.125	0.125
Total categorías del mapa		0.125	0.157	0.095	0.129	0.145	0.091	0.132	0.125	1.000
Proporción representada en el mapa		0.003	0.034	0.309	0.130	0.015	0.489	0.015	0.004	1.000
Año 2019		Categorías del mapa (verdad imagen)								
		Cuerpos de agua	Pastizal	Bosque de Oyamel	Bosque de Pino	Bosque de Pino Encino	Bosque de Pino Oyamel	Vegetación Secundaria	Agricultura	Total de puntos verificados (verdad terreno)
Verdad terreno (Categorías de referencia)	Cuerpos de agua	0.125	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.125
	Pastizal	0.000	0.121	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.125
	Bosque de Oyamel	0.000	0.005	0.120	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.125
	Bosque de Pino	0.000	0.000	0.000	0.114	0.007	0.005	0.000	0.000	0.125
	Bosque de Pino Encino	0.000	0.000	0.000	0.000	0.125	0.000	0.000	0.000	0.125
	Bosque de Pino Oyamel	0.000	0.000	0.000	0.009	0.009	0.108	0.000	0.000	0.125
	Vegetación Secundaria	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.125	0.000	0.125
	Agricultura	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.125	0.125
Total categorías del mapa		0.125	0.126	0.122	0.125	0.140	0.113	0.125	0.125	1.000
Proporción representada en el mapa		0.003	0.043	0.304	0.129	0.015	0.488	0.013	0.005	1.000

Fuente: Elaboración del autor.

La Tabla 9 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 de los mapas para ambos años (verdad imagen).

1. Para el año 2010 las proporciones corregidas son las siguientes: cuerpos de agua (0.3% de la superficie total); pastizal (3.5%); bosque de oyamel (32.2%); bosque de pino (10.2%); bosque mixto de pino encino (1.5%); bosque mixto de pino oyamel (51.8%); Vegetación secundaria (1.5%); agricultura (0.7% de la superficie total).
2. Para el año 2019 las proporciones corregidas son las siguientes: cuerpos de agua (0.3% de la superficie total); pastizal (4.8%); bosque de oyamel (30%); bosque de

pino (13.6%); bosque mixto de pino encino (1.4%); bosque mixto de pino oyamel (47.8%); Vegetación secundaria (1.3%); agricultura (0.9% de la superficie total).

Tabla 9. Análisis de confiabilidad de la cartografía, mediante la matriz de error para los años 2010 y 2019 expresada en proporción y corregida de acuerdo con Card (1982).

Año 2010		Categorías del mapa (verdad imagen)								
		Cuerpos de agua	Pastizal	Bosque de Oyamel	Bosque de Pino	Bosque de Pino Encino	Bosque de Pino Oyamel	Vegetación Secundaria	Agricultura	Total de puntos verificados (verdad terreno)
Verdad terreno (Categorías de referencia)	Cuerpos de agua	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003
	Pastizal	0.000	0.026	0.006	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.035
	Bosque de Oyamel	0.000	0.008	0.299	0.015	0.000	0.000	0.000	0.000	0.322
	Bosque de Pino	0.000	0.000	0.000	0.098	0.002	0.000	0.001	0.000	0.102
	Bosque de Pino Encino	0.000	0.000	0.000	0.000	0.013	0.002	0.000	0.000	0.015
	Bosque de Pino Oyamel	0.000	0.006	0.000	0.025	0.000	0.487	0.000	0.000	0.518
	Vegetación Secundaria	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.015	0.000	0.015
	Agricultura	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.004	0.007
Total categorías en el mapa		0.003	0.040	0.305	0.141	0.015	0.488	0.019	0.004	1.000
Proporción representada en el mapa		0.003	0.034	0.309	0.130	0.015	0.489	0.015	0.004	1.000
Año 2019		Categorías del mapa (verdad imagen)								
		Cuerpos de agua	Pastizal	Bosque de Oyamel	Bosque de Pino	Bosque de Pino Encino	Bosque de Pino Oyamel	Vegetación Secundaria	Agricultura	Total de puntos verificados (verdad terreno)
Verdad terreno (Categorías de referencia)	Cuerpos de agua	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003
	Pastizal	0.000	0.041	0.005	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.048
	Bosque de Oyamel	0.000	0.002	0.298	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.300
	Bosque de Pino	0.000	0.000	0.000	0.117	0.001	0.018	0.000	0.000	0.136
	Bosque de Pino Encino	0.000	0.000	0.000	0.000	0.013	0.001	0.000	0.000	0.014
	Bosque de Pino Oyamel	0.000	0.000	0.000	0.010	0.001	0.467	0.000	0.000	0.478
	Vegetación Secundaria	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.013	0.000	0.013

	Agricultura	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.005	0.009
Total categorías del mapa		0.003	0.043	0.304	0.130	0.015	0.486	0.017	0.005	1.000
Proporción representada en el mapa		0.003	0.043	0.304	0.129	0.015	0.488	0.013	0.005	1.000

Fuente: Elaboración del autor.

Los intervalos se determinaron para los 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 10 representa los resultados obtenidos de los intervalos de confianza de la confiabilidad del mapa para el año 2010.

1. Se identificó una proporción del 100% (verdad imagen) para la confiabilidad del usuario en las categorías cuerpos de agua y la agricultura, por lo que el error de comisión se considera del 0%, por otro lado, la menor confiabilidad corresponde al ecosistema de pastizales con el 80%, por lo que el error de comisión se calculó del 20%; de acuerdo a Mas (2003) este valor es el límite permitido en esta categoría.
2. En relación a la confiabilidad del productor los ecosistemas de cuerpos de agua y agricultura presentan una proporción del 100% (verdad imagen), por lo que el error de omisión corresponde al 0%; por otra parte, el ecosistema de pastizal presenta la mínima confiabilidad del productor con el 90% y el mayor nivel de error de omisión con el 10%.
3. En general la confiabilidad global que presenta el mapa de los ecosistemas para el año 2010 es del 95% (verdad imagen) y 2.65% del intervalo de confianza de la confiabilidad global.

Tabla 10. Confiabilidad global y sus intervalos de confianza para los ecosistemas presentes en el área de estudio para el año 2010.

Año 2010		Categorías en porcentaje (%)								Confiabilidad global (%)	Intervalo de confianza de la confiabilidad global (%)
		Cuerpos de agua	Pastizal	Bosque de Oyamel	Bosque de Pino	Bosque de Pino Encino	Bosque de Pino Oyamel	Vegetación secundaria	Agricultura		
Año 2010	Confiabilidad del usuario	100	80	98	97.0	85	99	95	100	95.00	2.65
	Error de comisión	0	20	2	3	15	1	5	0		
	Intervalo de confianza de	0.00	13.00	3.91	4.85	11.95	1.68	6.39	0.0		

la confiabilidad del usuario									
Confiabilidad del productor	100	90	93	97	88	94	100	98	
Error de omisión	0	10	7	3	12	6	0	0	
Intervalo de confianza de la confiabilidad del productor	0.00	0.09	0.08	0.05	0.10	0.07	0.00	0.24	

Fuente. Elaboración del autor.

Los resultados obtenidos de los valores correspondientes a los intervalos de confianza de la confiabilidad para el mapa del año 2019 (Tabla 11), muestran que:

1. Se identificó una proporción del 100% (verdad imagen) para la confiabilidad del usuario en las categorías cuerpos de agua y la agricultura, por lo que el error comisión sea del 0%, por otro lado, la menor confiabilidad corresponde al ecosistema forestal del bosque de pino con el 92%, por lo que el error de comisión sea del 8%.
2. En relación a la confiabilidad del productor, el ecosistema de cuerpos de agua presenta una proporción del 100% (verdad imagen), por lo que el error de omisión corresponde al 0%, por otra parte, la agricultura presenta la mínima confiabilidad del productor con el 83% y el mayor nivel de error de omisión con el 16%.
3. De manera general la confiabilidad global que presenta el mapa de los ecosistemas presentes para el año 2019 es del 95% (verdad imagen) y 2.86% del intervalo de confianza de la confiabilidad global.

Tabla 11. Confiabilidad global y sus intervalos de confianza para los ecosistemas presentes en el área de estudio para el año 2019.

Año 2019		Categorías en porcentaje (%)							Confiabilidad global (%)	Intervalo de confianza de la confiabilidad global (%)	
		Cuerpos de agua	Pastizal	Bosque de Oyamel	Bosque de Pino	Bosque de Pino Encino	Bosque de Pino Oyamel	Vegetación secundaria			Agricultura
Año 2019	Confiabilidad del usuario	100	95	98	92	94	96	84	100	95.00	2.86
	Error de comisión	0	5	2	8	6	4	16	0		
	Intervalo de confianza de la confiabilidad del usuario	0.00	6.18	3.73	8.00	6.85	5.53	15.13	0.0		
	Confiabilidad del productor	100	94	99	99	93	98	98	83		

Error de omisión	0	6	1	1	7	2	2	17	
Intervalo de confianza de la confiabilidad del productor	0.00	0.07	0.02	0.02	0.07	0.04	0.03	0.22	

Fuente: Elaboración del autor.

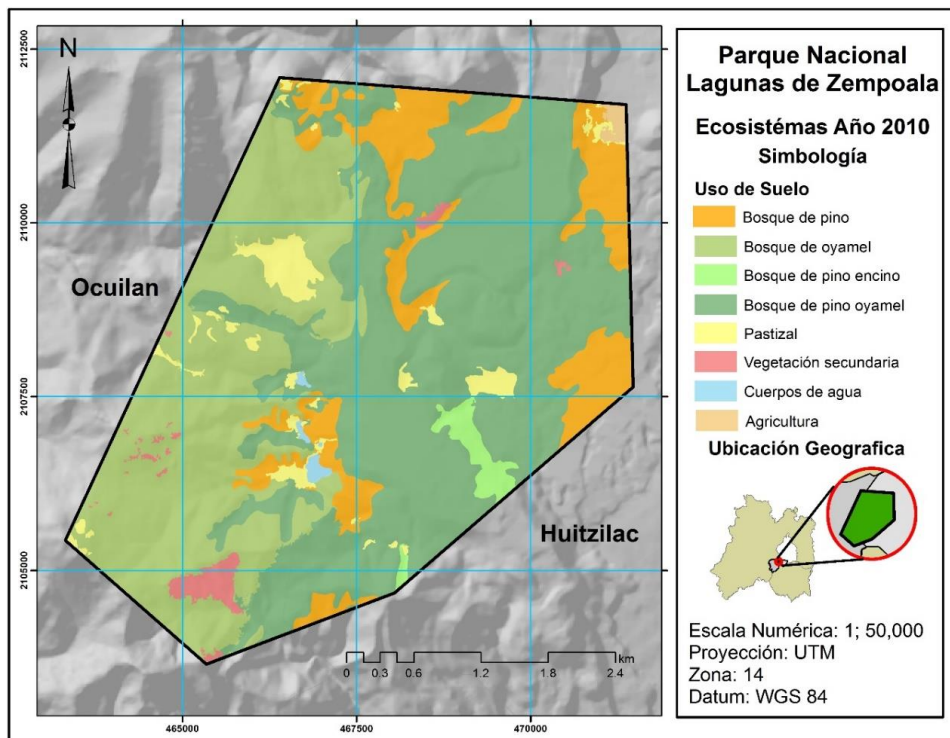
Ecosistemas forestales presentes en ANP Parque Nacional Lagunas de Zempoala

Los productos finales fueron dos mapas de los ecosistemas presentes de los años 2010 y 2019; para el primer año los resultados muestran que:

El Parque Nacional Laguna de Zempoala en el año 2010, presenta una superficie de 4556, distribuidos en ocho distintos ecosistemas el bosque mixto de pino oyamel con una superficie de 2,230 ha (48.95%), bosque de oyamel con 14,07 ha (30.88%), bosque de pino con superficie de 594 ha (13.04%), pastizal con 157 ha (3.45%), bosque mixto de pino encino con 69 ha (1.51%), vegetación secundaria con una superficie de 67 ha (1.47%), agroecosistemas de 17 ha (0.37%) y los cuerpos de agua con una superficie de 15 ha (0.33%), (Tabla 12 y Figura 2).

La confiabilidad global que presenta el mapa es del 95%, valor que rebasa el porcentaje mínimo permitido de 80 % para la validación cartográfica (Mas y Couturier, 2011).

Figura 2. Ecosistemas presentes en PNLZ para el año 2010.



Fuente: Elaboración del autor.

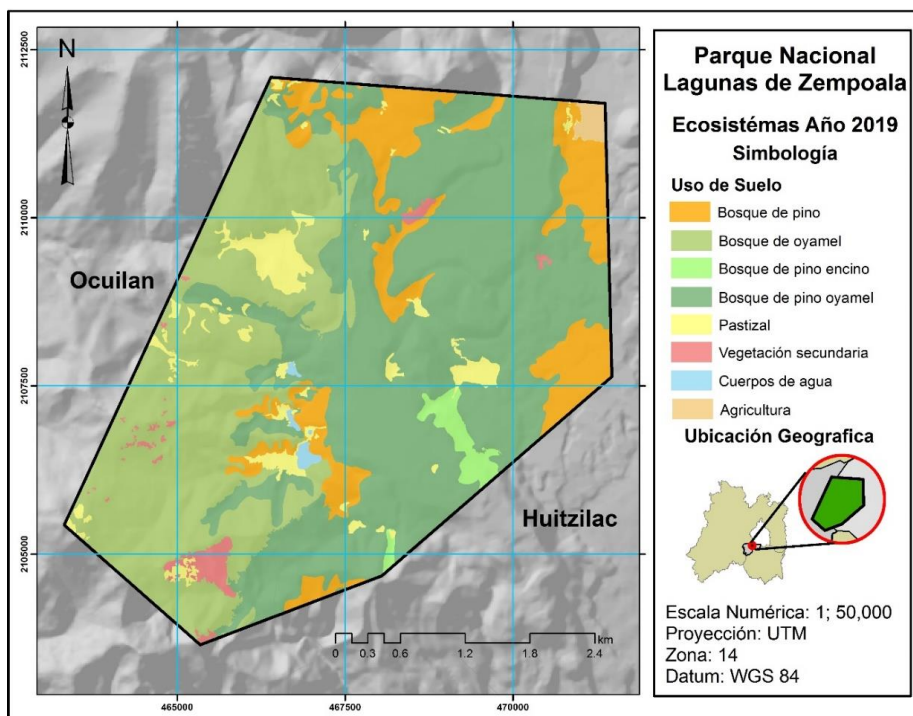
Tabla 12. Superficie de los ecosistemas presentes en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala en el año 2010.

N°	Ecosistema	Superficie (ha)	(%)
1	Bosque de Pino Oyamel	2,230	48.95
2	Bosque de Oyamel	1,407	30.88
3	Bosque de Pino	594	13.04
4	Pastizal	157	3.45
5	Bosque de Pino Encino	69	1.51
6	Vegetación Secundaria	67	1.47
7	Agricultura	17	0.37
8	Cuerpos de agua	15	0.33
	Total	4,556	100

Fuente: Elaboración del autor.

Para el año 2019 el PNLZ preserva una superficie total de 4556 ha distribuida en ocho ecosistemas diferentes. El ecosistema de mayor extensión es el bosque mixto de pino oyamel con una superficie de 2,225 ha (48.81%), bosque de oyamel con 1,385 ha (30.40%), bosque de pino con una superficie de 586 ha (12.86%), pastizal con una superficie de 194 ha (4.26%), bosque mixto de pino encino con una superficie de 68 ha (1.49%), vegetación secundaria con 60 ha (1.32%), los agroecosistemas con 24 ha (0.53%) y los cuerpos de agua con una superficie de 15 ha (0.33%), (Tabla 13 y Figura 3). La confiabilidad global que presenta el mapa es del 95%, valor que rebasa el porcentaje mínimo permitido de 80 % para la validación cartográfica (Mas y Couturier, 2011).

Figura 3. Ecosistemas presentes en PNLZ para el año 2019.



Fuente: Elaboración del autor.

Tabla 13. Superficie de los ecosistemas presentes en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala en el año 2019.

N°	Ecosistemas	Superficie (ha)	(%)
1	Bosque de Pino Oyamel	2,224	48.81
2	Bosque de Oyamel	1,385	30.40
3	Bosque de Pino	586	12.86
4	Pastizal	194	4.26
5	Bosque de Pino Encino	68	1.49
6	Vegetación Secundaria	60	1.32
7	Agricultura	24	0.53
8	Cuerpos de agua	15	0.33
	Total	4,556	100

Fuente: Elaboración del autor.

Ajuste a las superficies derivadas de los mapas clasificados

La Tabla 14 presenta los resultados de los valores correspondientes a la proporción corregida en relación al resultado del ajuste de los errores de clasificación. Los ecosistemas de cuerpos de agua y vegetación secundaria no requirieron una corrección resultado de la ausencia de errores de omisión y comisión respecto para ambos mapas.

Tabla 14. Superficies obtenidas de la clasificación, superficies corregidas por el método de Card y proporción de la superficie corregida para cada ecosistema.

Año 2010	Cuerpos de agua	Pastizal	Bosque de Oyamel	Bosque de Pino	Bosque de Pino Encino	Bosque de Pino Oyamel	Vegetación secundaria	Agricultura	Superficie (ha)	Proporción corregida	Superficie corregida (ha)
Cuerpos de agua	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	15	0.000	15
Pastizal	0.000	0.947	0.024	0.029	0.000	0.000	0.000	0.000	157	0.035	167
Bosque de Oyamel	0.000	0.174	0.740	0.087	0.000	0.000	0.000	0.000	1407	0.322	1425
Bosque de Pino	0.000	0.000	0.000	0.780	0.165	0.000	0.055	0.000	594	0.102	532
Bosque de Pino Encino	0.000	0.000	0.000	0.000	0.996	0.004	0.000	0.000	69	0.016	80
Bosque de Pino Oyamel	0.000	0.138	0.000	0.138	0.000	0.725	0.000	0.000	2230	0.517	2250
Vegetación secundaria	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	67	0.001	67
Agricultura	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.998	17	0.007	20
Proporción representada en el mapa	0.003	0.034	0.309	0.130	0.015	0.489	0.015	0.004	4556	1.0	4556
Año 2019	Cuerpos de agua	Pastizal	Bosque de Oyamel	Bosque de Pino	Bosque de Pino Encino	Bosque de Pino Oyamel	Vegetación secundaria	Agricultura	Superficie (ha)	Proporción corregida	Superficie corregida (ha)

Cuerpos de agua	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	15	0.003	15
Pastizal	0.000	0.964	0.018	0.018	0.000	0.000	0.000	0.000	194	0.048	323
Bosque de Oyamel	0.000	0.043	0.957	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1385	0.300	1351
Bosque de Pino	0.000	0.000	0.000	0.910	0.054	0.036	0.000	0.000	586	0.136	712
Bosque de Pino Encino	0.000	0.000	0.000	0.000	0.998	0.002	0.000	0.000	68	0.014	61
Bosque de Pino Oyamel	0.000	0.000	0.000	0.069	0.069	0.863	0.000	0.000	2224	0.478	2004
Vegetación secundaria	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.996	0.000	60	0.013	60
Agricultura	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.997	24	0.009	30
Proporción representada en el mapa	0.003	0.043	0.304	0.129	0.015	0.488	0.013	0.005	4556	1.0	4556

Fuente: Elaboración del autor.

Análisis de los procesos de cambio de los ecosistemas presentes en el PNLZ

La dinámica general de los cambios presentados en los ecosistemas forestales en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala muestra una pequeña disminución en las coberturas forestales entre los años 2010 y 2019, lo que se relaciona con el aumento de las actividades antrópicas dentro del ANP y el aumento de la deforestación durante la última década.

Los resultados obtenidos para los indicadores de cambio de los años 2010 y 2019 se muestran en la Tabla 15, el total de la superficie del ANP es de 4556 ha, de las cuales 4,481 hectáreas (98.35%) no presentaron ningún cambio y se mantuvieron estables. Por otra parte, 75 ha (1.65%), mostraron cambios (pérdidas-ganancias), el cambio total es de 75 ha (1.65% de la superficie), de las cuales 46 ha (1.01%) corresponde a los intercambios y 29 ha (0.64%) al cambio neto.

Los ecosistemas que presentan los incrementos más importantes son los pastizales con 46 ha equivalentes a 1.01% del total de la superficie y los agroecosistemas que aumentaron su superficie 8ha, lo que representa un aumento del 0.18% del total de la superficie. Por otra parte, las coberturas que presentan las mayores pérdidas son los ecosistemas forestales de bosque de oyamel y bosque de pino.

Tabla 15. Análisis de los cambios de la superficie de cada ecosistema en el área de estudio para los años 2010 y 2016.

2010-2019	Agricultura	Cuerpos de agua	Bosque de Oyamel	Bosque de pino	Bosque de pino encino	Bosque de pino oyamel	Pastizal	Vegetación secundaria	Total Ha/%
Área 2010 (ha)	17	15	1407	594	69	2230	157	67	4556.00
(%)	0.37	0.33	30.88	13.04	1.51	48.95	3.45	1.47	100.00
Área 2019 (ha)	24.00	15.00	1385.00	586.00	68.00	2224.00	194.00	60.00	4556.00
(%)	0.53	0.33	30.40	12.86	1.49	48.81	4.26	1.32	100.00
Persistencia	16.00	14.00	1380.00	580.00	67.00	2220.00	148.00	56.00	4481.00

(%)	0.35	0.31	30.29	12.73	1.47	48.73	3.25	1.23	98.35
Pérdidas	1.00	1.00	27.00	14.00	2.00	10.00	9.00	11.00	75.00
(%)	0.02	0.02	0.59	0.31	0.04	0.22	0.20	0.24	1.65
Ganancias	8.00	1.00	5.00	6.00	1.00	4.00	46.00	4.00	75.00
(%)	0.18	0.02	0.11	0.13	0.02	0.09	1.01	0.09	1.65
Cambio total	9.00	2.00	32.00	20.00	3.00	14.00	55.00	15.00	75.00
(%)	0.20	0.04	0.70	0.44	0.07	0.31	1.21	0.33	1.65
Cambio neto	7.00	0.00	22.00	8.00	1.00	6.00	37.00	7.00	29.00
(%)	0.15	0.00	0.48	0.18	0.02	0.13	0.81	0.15	0.64
Intercambios	2.00	2.00	10.00	12.00	2.00	8.00	18.00	8.00	46.00
(%)	0.04	0.04	0.00	0.00	0.04	0.18	0.40	0.18	1.01

Fuente: Elaboración del autor.

CONCLUSIONES

Con base en los resultados se concluye que existe deterioro ambiental, puesto que se observa un proceso de deforestación asociado principalmente al desarrollo de actividades antrópicas dentro del parque, tales como actividades turísticas, ganaderas, agrícolas y de infraestructura vial; por lo que los ecosistemas forestales han presentados cambios en su superficie, por ejemplo para el año 2010 los bosques representaban una superficie de 4300 ha mientras que para el año 2019 presentaron una superficie de 4263 ha.

Las problemáticas que se asocian a lo anterior son la pérdida de micro ecosistemas, la reducción en la producción de oxígeno, alteraciones en la captura de carbono de los ecosistemas forestales. Lo mencionado tiene relación con la reducción en la superficie de los ecosistemas forestales, mientras que los pastizales y las zonas agrícolas presentan ganancias en su superficie.

Respecto al trabajo de campo realizados mediante recorridos “*in situ*” y observación directa, se identificó que existe una transición marcada en la pérdida de los ecosistemas forestales, la cual está en función del establecimiento de nuevas áreas agrícolas que se desarrollan a partir de zonas deforestadas, principalmente en las zonas norte y este del área de estudio, donde se presentan las menores pendientes y cuentan con mejores vías de acceso.

Las investigaciones asociadas a los cambios de uso de suelo mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) permiten identificar relaciones entre las problemáticas ambientales y sociales, ya que son de gran utilidad para la toma de decisiones por parte de las autoridades correspondientes, lo que permitirá tomar acciones reales para la restauración y preservación de áreas prioritarias en el PNLZ, en las que se presentan mayores niveles de deterioro ambiental.

BIBLIOGRAFÍA

Bonilla J. R. y 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. M., Juan, J. I., Pineda, N. B., Cadena, E. G., Bravo, L. C. y 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.
- 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. y 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. F., 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. F. y 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.
- Pontius, R. G. Jr., E. Shusas and 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 y 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.
- Sahagún, F y Reyes, H. (2018). Impactos por cambio de uso de suelo en las áreas naturales protegidas de la región central de la Sierra Madre Oriental, México. *Biología y Química*, 12, 06-2.

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

© Santiago Juan Medina Silva, Marisol de la Cruz Jasso, Miguel Ángel Balderas Plata y Jesús Gastón Gutiérrez Cedillo.

Medina Silva, S.J.; de la Cruz Jasso, M.; Balderas Plata, M.A.; Gutiérrez Cedillo, J.G. (2021). Los ecosistemas forestales en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala. Evolución espacio-temporal. *Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GeoSIG)*. 13 (21) Sección I:1-23

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

Recibido: 10 de febrero de 2021

Aceptado: 27 de junio de 2021