

**IDENTIFICACIÓN DE USOS DEL SUELO EN EL PARQUE OTOMÍ MEXICA
A TRAVÉS DE MATRICES DE CONFUSIÓN 2014 Y 2018**

Brenda Yazmin Reza Curiel¹, Martín García Ávila¹, Jesús Gastón Gutiérrez Cedillo²
Universidad Autónoma del Estado de México

RESUMEN

Esta investigación tiene como objetivo identificar y cuantificar los usos del suelo presentes a través de matrices de confusión o matrices de error, para determinar cómo está estructurada la distribución del suelo en el Parque Otomí Mexica. La metodología consta de las siguientes etapas: 1) Procesamiento de imágenes de satélite 2014 y 2018 para la preclasificación; para obtener menor error se aplicaron métodos, técnicas y procedimientos relacionados con la corrección geométrica y corrección atmosférica de las imágenes de satélite; la corrección geométrica de las imágenes de satélite se hizo mediante puntos de control. 2) Identificación de los tipos de ecosistemas presentes en el parque Otomí Mexica; se realizó por medio de la validación de los mapas de cobertura y uso del suelo de la serie IV de INEGI para el año 2014 y la serie VI de INEGI para el año 2018 escala 1: 250,000. 3) Evaluación de sitios de verificación: consistió en asociar los puntos de muestreo con base en una clase principal y una adicional del mapa. 4) Verificación de análisis de datos, se confrontaron los sitios de verificación con las categorías clasificadas en los mapas. Esto mediante una matriz de confusión o matriz de error para comprobación.

Palabras clave: Clasificación, Matriz de confusión, Postclasificación, Tipos de Ecosistemas, Uso de suelo.

**IDENTIFICATION OF LAND USE IN THE OTOMÍ MEXICA PARK THROUGH
CONFUSION MATRIXES 2014 AND 2018**

ABSTRACT

This research aims to identify and quantify the present land uses through confusion matrices or error matrices, to determine how the distribution of land in the Otomí Mexica Park is structured. The methodology consists of the following stages: 1) Processing of 2014 and 2018 satellite images for preclassification; To obtain less error, methods, techniques and procedures related to geometric correction and atmospheric correction of satellite images were applied; The geometric correction of the satellite images was done using control points. 2) Identification of the types of ecosystems present in the Otomí Mexica park; It was carried out through the validation of the land cover and use maps of the INEGI series IV for the year 2014 and the INEGI series VI for the year 2018 scale 1: 250,000. 3) Evaluation of verification sites: consisted of associating the sampling points based on a main class and an additional class on the map. 4) Verification of data analysis, the verification sites were compared with the categories classified on the maps. This is done using a confusion matrix or error matrix for verification.

Keywords: Classification; Confusion matrix; Postclassification; Types of Ecosystems; Land use.

¹ Unidad Académica Profesional de Tianguistenco, Universidad Autónoma del Estado de México. Paraje el Tejocote, San Pedro Tlaltizapan, Santiago Tianguistenco, México. C.P. 52640. E-mail. brenda_reza@hotmail.com

²Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México. Cerro de Coatepec s/n, Ciudad Universitaria, Toluca, Estado de México C.P. 50100. E-mail. jggc1321@yahoo.com.mx

1. INTRODUCCIÓN

La presente investigación tiene como objetivo identificar los usos de suelo presentes en el Área Natural Protegida del Parque Ecológico, Turístico y Recreativo Zempoala la Bufo, denominado Parque Otomí-Mexica del Estado de México, es el ANP de mayor extensión territorial en el Estado de México (105,844.13 ha). Por su ubicación geográfica el territorio del parque desempeña una función biofísica y sociocultural de vital importancia para los más de 27 millones de habitantes que viven en las Zonas Metropolitanas adyacentes al ANP (INEGI, 2015).

Desde el punto de vista ambiental aporta solución al cambio de uso de suelo por consecuencia antrópica generadas por los habitantes que viven en zonas internas y aledañas al Parque Otomí Mexica. Desde el punto de vista social la conservación y funcionamiento adecuado de los ecosistemas que conforman el territorio del parque es importante, ya que es una fuente valiosa de componentes naturales que provee diversos servicios ecosistémicos como: agua, oxígeno, alimentos, recursos maderables y minerales, materias primas para la elaboración de medicamentos, utensilios del hogar y herramientas de trabajo, algunos de ellos indispensables para el bienestar de las poblaciones que habitan dentro y en la periferia de sus territorio administrativo.

Se validaron los resultados de los mapas de uso de suelo de la serie IV de INEGI para el año 2014 y la serie VI de INEGI para el año 2018 escala 1: 250,000, con base en las matrices de confusión, aplicados por (CAMACHO SANABRIA, 2019) para obtener el índice de confiabilidad de intervalos de confianza para cada ecosistema.

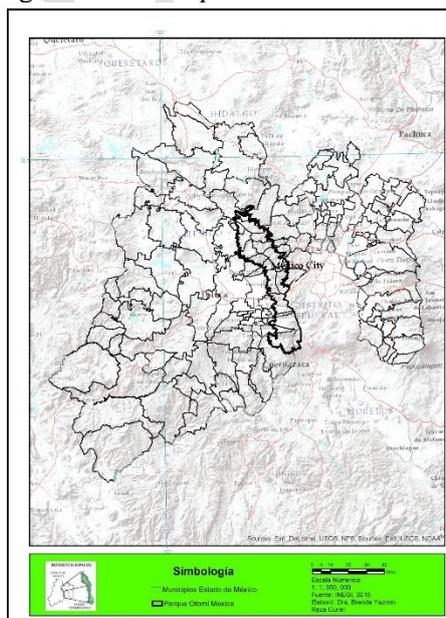
2. ÁREA DE ESTUDIO

El Parque Otomí – Mexica Estado de México, está ubicado en el contexto geográfico del centro de México, donde convergen, la Zona Metropolitana del Valle de México, la Zona Metropolitana del Valle de Toluca y la Zona Metropolitana de Cuernavaca. Sus coordenadas geográficas extremas son: 18° 59' 59.57" - 19° 45' 19.34" de latitud norte y 99° 20' 21.75" - 99° 32' 01.41" de longitud oeste.

Tiene una superficie aproximada de 105, 875 hectáreas, que se encuentran distribuidas espacialmente en 17 municipios del Estado de México: Chapa de Mota, Huixquilucan, Isidro Fabela, Jilotzingo, Jiquipilco, Lerma, Naucalpan, Nicolás Romero, Ocoyoacac, Ocuilan, Otzolotepec, Morelos, Temoaya, Tianguistenco, Villa del Carbón, Xatlalaco y Xonacatlán, (JUAN et al., 2017).

FIGURA 1

Ubicación Geográfica del Parque Otomí Mexica Estado de México.



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

IDENTIFICACIÓN DE USOS DEL SUELO EN EL PARQUE OTOMÍ MEXICA A TRAVÉS DE MATRICES DE CONFUSIÓN 2014 Y 2018

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Las matrices de cambios (o matrices de tabulación cruzada) que se utilizaron para dicha investigación es una tabla bidimensional donde las columnas representan el área de las categorías cartografiadas en el mapa correspondiente al año 2014, mientras que las filas contienen la superficie de las categorías del año 2018. La diagonal principal representa la persistencia, o bien el área conservada de cada una de las categorías durante el periodo de análisis (2014 – 2018).

3.1 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DE SATÉLITE 2014 Y 2018 PARA LA PRECLASIFICACIÓN

En esta etapa se eliminan ruidos causados por la señal que llega al satélite por atravesar la atmósfera. “El efecto de la distorsión de la señal produce errores en la localización como en los niveles digitales de los píxeles. Se trata de radiaciones radiométricas y geométricas que no coinciden con el tono, posición y tamaños de los objetos”. (CHUVIECO SALINERO, 1996)

Con la finalidad de tener menor error en el proceso de clasificación y postclasificación se aplicaron métodos, técnicas y procedimientos relacionadas con la corrección geométrica y corrección atmosférica de las imágenes de satélite mencionadas.

Para realizar la corrección geométrica de las imágenes de satélite se hizo mediante puntos de control con una imagen de referencia.

El ajuste entre cada una de las diferentes imágenes de satélite y el mosaico se realizó a partir de una función de transformación de segundo grado u orden, que considera como mínimo seis puntos de control (CHUVIECO SALINERO, 2008). Para dicha investigación se registraron 70 puntos de control para cada imagen, para tener una mayor precisión entre las imágenes de satélite y el mosaico, el error medio cuadrático fue de 8 metros.

La distribución de puntos de control se colocó en toda la imagen de satélite omitiendo colocar puntos en intersecciones de carreteras, caminos, paisajes, ríos, entre otros. “Una vez corregidas las imágenes fue necesario transferir (ubicar) los niveles digitales (ND) de las imágenes originales (con errores geométricos) a su nueva posición. Esto fue posible mediante el método del vecino más próximo, pues es el único método de interpolación radiométrica o remuestreo que preserva los valores originales al no introducir promedios”, (CHUVIECO SALINERO, 2008). Los procesos descritos se llevan a cabo en ArcMap 10.4.

La corrección atmosférica de las imágenes satelitales se realizó en el módulo ATMOSC (Atmospheric Correction) del software Idrisi Selva (EASTMAN R., 2012), a partir del módulo de Reflectancia Aparente (CHUVIECO SALINERO, 2008), considerando la fecha y la hora de adquisición de la imagen, la longitud de onda media de cada banda (en micras), la radiancia mínima y máxima, el ND máximo de la imagen, ángulo de visión del satélite, y la elevación solar, estos datos se obtuvieron del archivo de metadatos de cada imagen.

La calibración de la radiancia de cada una de las bandas correspondientes a cada imagen se realizó mediante la opción Lmin/Lmax. En este sentido según (CHANDER Y MARKHAM, 2003 en CAMACHO SANABRIA, 2019) argumentan que cuando se comparan imágenes de distintas fechas (como en este estudio) es necesario transformar los valores de radiancia a reflectancia debido a que se remueve el efecto producido por el ángulo solar, para compensar las diferencias en los valores de la irradiancia solar extra-atmosférica. Esto es posible a través de la corrección atmosférica.

3.2 IDENTIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE VEGETACIÓN PRESENTES EN EL PARQUE OTOMÍ MEXICA.

La identificación de tipos de vegetación en el área de estudio se realizó por medio de la validación de los mapas de cobertura y uso del suelo para conocer su grado de fiabilidad de la serie IV de INEGI para el año 2014 y la serie VI de INEGI para el año 2018 escala 1: 250,000 cada mapa cuenta con nueve categorías las cuales son: 1) bosque de pino, 2) bosque de encino, 3) bosque de oyamel, 4) bosque pino- encino, 5) bosque mesófilo de montaña, 6) agricultura de temporal, 7) asentamientos humanos, 8) pastizal inducido, 9) agricultura de riego, para ser analizada mediante cartografía automatizada.

3.3 IDENTIFICACIÓN DE LOS ECOSISTEMAS PRESENTES EN EL PARQUE OTOMÍ MEXICA.

Se identificaron los ecosistemas por medio de su ubicación para ello está la tendencia espacial de distribución de los Ecosistemas como son: 1) Latitud: hace referencia a la posición geográfica en relación al meridiano donde el ecosistema se encuentra ubicado. De esto depende si el ecosistema tendrá un clima frío (ubicado cerca de los polos) o cálido (cerca de la línea ecuatorial). 2) Altitud: otro factor característico está determinado por la altitud pues a mayor altura, mayor cantidad de precipitaciones y menores temperaturas.

Delimitación de cada ecosistema considerando píxeles individuales debido a que la clasificación de las imágenes de satélite se llevó a cabo píxel a píxel, la identificación de cada ecosistema con un tamaño de muestra de 50 sitios por categoría determinado por (CONGALTON RUSSELL, 1991), y cuantificación de la superficie ocupada por cada ecosistema en ambos periodos; y validación de la cartografía para conocer el grado de confiabilidad de los mapas de ecosistemas por medio de matrices de confusión para cada año de estudio, que es una tabla bidimensional donde generalmente las filas representan las clases de referencia (verdad terreno o sitios de verificación) y las columnas las categorías del mapa (Verdad imagen).

En la (tabla 1), se identifican los ecosistemas presentes de la serie III (INEGI, 2002), a partir de ello se determinarán los tipos de vegetación y ocupación del suelo.

TABLA 1

Principales ecosistemas en el Parque Estatal Otomí – Mexica del Estado de México.

CATEGORIA	DESCRIPCIÓN
Bosque de pino	Se refiere a la cobertura arbórea de tipo disperso.
Bosque de encino	Se caracteriza por que está constituida por formaciones densas o al menos cerradas, sin embargo, en algunas zonas del parque estas especies crecen separadas con amplios espacios cubiertos por arbustos y herbáceas.
Bosque de oyamel	Se caracteriza por desarrollarse generalmente en suelos profundos y suelos someros con presencia de una capa muy delgada de ceniza volcánica, ricos en materia orgánica.
Bosque pino- encino	Se caracteriza por tener comunidades arbóreas de gran altura acompañados por otras especies entre las que destacan el madroño, aile y trompillo, especies latifoliadas y consideradas poco representativas en cuanto a abundancia y distribución.
Bosque mesófilo de montaña	Se caracterizan por que crecen los árboles a lo largo de los ríos.
Agricultura de temporal	Se considera solo la agricultura de temporal
Asentamientos humanos	Son zonas donde se concentran las viviendas de distintos tipos, comercios, escuelas e infraestructura urbana, principalmente. Se refiere a las cabeceras municipales, localidades urbanas y a los asentamientos aislados que son perceptibles desde las imágenes.
Pastizal inducido	Constituye los pastos inducidos que se establecieron y desarrollaron después de eliminar la vegetación primaria. También se incluyen las praderas cultivadas para el ganado.
Agricultura de riego	Se considera solo la agricultura de riego

Fuente: Elaboración propia con base en (INEGI, 2014 -2018) y Trabajo de campo (2020).

IDENTIFICACIÓN DE USOS DEL SUELO EN EL PARQUE OTOMÍ MEXICA A TRAVÉS DE MATRICES DE CONFUSIÓN 2014 Y 2018

3.4 EVALUACIÓN DE SITIOS DE VERIFICACIÓN

La selección y delimitación de los campos de entrenamiento o áreas de interés (número total de píxeles) se realizó con base en la regla general establecida por (JENSEN JOHN, 1996), quien recomienda seleccionar mínimo 10 veces el número de bandas utilizadas en el desarrollo de las estadísticas de entrenamiento, o bien, para calibrar el clasificador.

Se utilizaron para esta investigación seis bandas de la escena de Landsat TM (excluyendo la banda térmica) y a partir de estas se generó un compuesto de falso color con las bandas TM4 (infrarrojo cercano), TM3 (visible rojo) y TM2 (visible verde). Posteriormente se digitalizaron un total de 70 campos o áreas de entrenamiento distribuidos de manera aleatoria y uniforme, en cada una de las diferentes imágenes 2014 y 2018 (mínimo 10 campos por cada una de las clases).

Para la localización de los campos de entrenamiento se realizó a partir del conocimiento experto y producto de los recorridos de campo in situ. Dicha actividad aprobó la identificación de cada cobertura por medio de la observación directa y la ubicación de las mismas mediante el Sistema de Geoposicionamiento Global. Esta etapa se complementó con datos auxiliares derivados de la interpretación visual de imágenes de alta resolución espectral, disponible en Google Earth. La selección de campos de entrenamiento se llevó a cabo para dos imágenes de satélite.

La digitalización de los polígonos correspondientes a esta clase se realizó mediante el uso de imágenes de alta resolución espectral del año 2014, disponibles en Google Earth.

Debido a la topografía existente en el Parque Otomí- Mexica, fue necesario delimitar campos de entrenamiento para las zonas de sombra. Esto con el propósito de minimizar los errores temáticos al momento de validar o evaluar el grado de confiabilidad de los mapas de coberturas y usos del suelo producto de la clasificación.

Con base en los píxeles prototipo de cada categoría (campo de entrenamiento) se obtuvieron firmas espectrales para realizar el análisis de la separabilidad espectral a través del método de Divergencia Transformada. La aplicación de este método se justifica debido a que es el más utilizado en estudios donde se emplea la clasificación de máxima verosimilitud (MAUSEL et al., 1990 en CAMACHO SANABRIA, 2019), como el caso de este estudio. Se obtuvieron valores mayores a 1 900 (buena separabilidad) entre cada una de las categorías de análisis.

A partir de las firmas espectrales se realizó la clasificación supervisada de las imágenes de satélite, aplicando el método de clasificación puntual (LIRA, 2010 en CAMACHO SANABRIA, 2019) y el algoritmo de máxima verosimilitud o máxima probabilidad que es el más comúnmente utilizado en la Percepción Remota y se considera uno de los procedimientos de discriminación más acertados y eficiente, toda vez que los datos sigan una función de distribución normal (MASSELLI et al., 1992; LILLESAND et al., 2007; GARCÍA Y MAS, 2011 en CAMACHO SANABRIA, 2019).

En total se clasificaron nueve categorías para el mapa del año 2014 y nueve para el mapa 2018. A las coberturas clasificadas se les aplicó el filtro de moda para reducir el efecto “sal y pimienta” y con ello minimizar la probabilidad de que píxeles aislados sesgaran la evaluación de la confiabilidad post-clasificatoria (CHUVIECO SALINERO, 2008). Esta fase metodológica se llevó a cabo en el software Idrisi Selva.

La identificación de los usos del suelo presentes se llevó a cabo mediante la validación de los mapas de cobertura y uso del suelo para conocer su grado de fiabilidad. Distintos especialistas en el tema argumentan que cuantificar la fiabilidad de un producto cartográfico, permite a los usuarios valorar su ajuste con la realidad y así, asumir el riesgo de toma de decisiones con base a esta información. Además, ayuda a conocer y modelar el error que resulte del uso de estos datos modelados en un SIG (LUNETTA et al., 1991; GOODCHILD et al. 1992; BURROUGH, 1994 en CAMACHO SANABRIA, 2019). Por lo que la evaluación de confiabilidad temática de los mapas de cobertura y usos del suelo se realizó a partir de las siguientes etapas metodológicas (MAS et al., 2003 en CAMACHO SANABRIA, 2019):

Diseño de muestreo. En esta etapa se determinaron las unidades de muestreo, el método de muestreo y el tamaño de la muestra. Como unidades de muestreo se consideraron píxeles individuales debido a que la clasificación de las imágenes de satélite se llevó a cabo píxel a píxel (JENSEN JOHN, 1996).

Se aplicó el método aleatorio estratificado para asegurar que no se sobre-muestren las categorías con mayor superficie con relación a las de menor extensión territorial (CARD, 1982 en CAMACHO SANABRIA, 2019). El tamaño de la muestra se determinó con base a (CONGALTON RUSSELL, 1991), que sugiere verificar, por lo menos, 50 sitios por categoría. Por tanto, se verificaron 450 puntos de muestreo para el mapa del año 2014 y 450 puntos para el mapa de 2018.

3.5 VALIDACIÓN DE LOS DATOS DE CLASIFICACIÓN

Para validar los resultados obtenidos de las imágenes de satélite se complementó con un recorrido “*in situ*” para ratificar si los puntos establecidos corresponden a los ecosistemas identificados en las imágenes de satélite se registraron 70 puntos de control para cada imagen, para tener una mayor precisión entre las imágenes de satélite y el mosaico, 50 se verificaron en campo con GPS y 20 se verificaron a través de imágenes de alta resolución espacial de Google Earth y Google Maps ya que son sitios de difícil acceso, de restricción y de inseguridad dentro del área de estudio. Todos los puntos de verificación se correlacionaron con los píxeles clasificados en las imágenes de satélite y coinciden con los ecosistemas identificados.

Evaluación de sitios de verificación. Consistió en asociar los puntos de muestreo con base en una clase principal y una adicional del mapa, para evitar subestimar la confiabilidad de los insumos cartográficos evaluados (KHORRAM et al., 2000 en CAMACHO SANABRIA, 2019). El mapa del año 2014 se validó a partir de la interpretación visual y el conocimiento experto de un especialista en la temática, considerando la imagen de satélite que se utilizó en el proceso de clasificación de este mapa. A través de este mismo procedimiento se evaluó el mapa de 2018, sólo que se utilizaron imágenes de alta resolución espectral de Google Earth del mismo año.

Análisis de los datos. Esta etapa consistió en confrontar los sitios de verificación (puntos de muestreo) con las categorías clasificadas en los mapas. Esto mediante una matriz de confusión o matriz de error, que es una tabla bidimensional donde generalmente las filas representan las clases de referencia (verdad terreno o sitios de verificación) y las columnas las categorías del mapa (Verdad imagen), lógicamente ambas tendrán el mismo número y significado. La diagonal de la matriz expresa el número de puntos de verificación para los cuales existe una correspondencia entre las categorías del mapa clasificado y las clases de referencia, mientras los marginales indican errores de asignación (USDA, 1995; MAS et al., 2003; FRANCO et al., 2006 en CAMACHO SANABRIA, 2019), (Tabla, 2)

TABLA 2
Matriz de confusión o matriz de error

Verdad en el terreno (Clases de referencia = i)	Verdad imagen (categorías del mapa = j)				
	j1	j2	...	jq	Total
i1	i1j1	i1j2	...	i1jq	i1+
i2	i2j1	i2j2	...	i2jq	i2+
...
iq	iqj1	iqj2	...	iqjq	iq+
Total	+j1	+j2	...	+jq	$\Sigma +j$ $\Sigma i +$

Fuente: Elaboración propia con base en (MAS Y COUTURIER, 2011 en CAMACHO SANABRIA, 2019)

Nota: ij = corresponde al número de píxeles (superficie) correctamente clasificados de cada categoría o clase; i1+= es la suma de los píxeles (superficie) correspondiente a la clase de referencia i1; +j1 = corresponde a la suma de los píxeles (superficie) de la categoría del mapa j1; $\Sigma +j$ o $\Sigma i +$ = es el total de la suma de los píxeles de las clases de referencia ($\Sigma P_i +$), o bien, el total de la suma de los píxeles correspondientes a las categorías del mapa ($\Sigma P +j$). También este dato corresponde al número total de puntos o sitios muestrados.

Así mismo se construyeron dos matrices de confusión, misma que fueron corregidas o ajustadas con el propósito de ponderar el número de sitios de verificación en relación (proporción) a la

IDENTIFICACIÓN DE USOS DEL SUELO EN EL PARQUE OTOMÍ MEXICA A TRAVÉS DE MATRICES DE CONFUSIÓN 2014 Y 2018

superficie de cada categoría representada en el mapa (Card, 1982) (Tabla 3). A partir de los ajustes realizados a estas matrices se calculó la proporción y área de cada una de las categorías o clases de análisis (MAS Y COUTURIER, 2011, en CAMACHO SANABRIA; 2019)

TABLA 3

Matriz de confusión expresada en proporción

Verdad en el terreno (Clases de referencia = i)	Verdad imagen (categorías del mapa = j)				
	j1	j2	...	jq	Total
i1	Pi1j1	Pi1j2	...	Pi1jq	Pi1+
i2	Pi2j1	Pi2j2	...	Pi2jq	Pi2+
...
iq	Piqj1	Piqj2	...	Piqjq	Piq+
Total	P+j1	P+j2	...	P+jq	$\Sigma P+j$ $\Sigma P i+$

Fuente: Elaboración propia con base en (MAS Y COUTURIER, 2011 en CAMACHO SANABRIA, 2019) Nota: P_{ij} = proporción de píxeles (superficie) correctamente clasificados de cada categoría o clase; P_{i1+} = es la suma de las proporciones de los píxeles (superficie) correspondiente a la clase de referencia i1; P_{+j1} = corresponde a la suma de las proporciones de los píxeles (superficie) de la categoría del mapa j1; y ΣP_{+j} o ΣP_{i+} = es el total de la suma de las proporciones de los píxeles de las clases de referencia (ΣP_{i+}), o bien, el total de la suma de las proporciones de los píxeles correspondientes a las categorías del mapa (ΣP_{+j}).

Con base en los datos incluidos en las matrices de error o confusión (Tabla 3) se determinaron los índices de fiabilidad para cada una de las categorías y el medio intervalo de confianza (ARONOFF, 1982; JANSSEN Y VAN DER WEL, 1994; STEHMAN Y CZAPLEWSKI, 1998; CHUVIECO, 2008; MAS Y COUTURIER, 2011 en CAMACHO SANABRIA, 2019). Para el cálculo de este último se consideró una fiabilidad estimada del 80% (Tabla 4)

TABLA 4

Índice de fiabilidad y medio intervalo de confianza.

Índice	Expresión matemática	Descripción
Confiabilidad global exactitud general	$CG(\Sigma P_{ij} / \Sigma P_{+j} \text{ o } P_{i+}) * 100$	Es la proporción de píxeles (superficie) correctamente clasificados en los mapas, producto de la interpretación de las imágenes de satélite. El coeficiente derivado de su cálculo representa la probabilidad para cualquier sitio en el mapa de ser correctamente clasificado.
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. Donde $z \alpha / 2$ es el valor que separa a un área de $\alpha / 2$ en la cola del lado derecho de la distribución normal estándar (el valor $z \alpha / 2$ en este estudio corresponde a 1.96); p es la fiabilidad esperada y; n corresponde al tamaño de la muestra.
Error de comisión	$EC = (1 - (P_{ij} / P_{+j})) * 100$	Indica la proporción de sitios de verificación cartografiada en una cierta clase j, pero que en realidad pertenece a otra categoría.
Error de omisión	$(Eo) = (1 - (P_{ij} / P_{i+})) * 100$	Representa la proporción de sitios de verificación correspondientes a una categoría j que fue cartografiada en otra.
Confiabilidad del usuario	$Cu = (P_{ij} / P_{+j}) * 100$	Se interpreta como la probabilidad que un sitio clasificado como j y aleatoriamente seleccionado sea realmente j en el terreno.
Confiabilidad del productor	$Cp = (P_{ij} / P_{i+}) * 100$	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: Elaboración propia con base en (ARONOFF, 1982; JANSSEN Y VAN DER WEL, 1994; STEHMAN Y CZAPLEWSKI, 1998; CHUVICO, 2008, MAS Y COUTURIER, 2011 en CAMACHO SANABRIA, 2019)

3.6 ANÁLISIS DE IMPACTO AMBIENTAL Y SOCIAL

Para enriquecer el estudio se hizo un análisis de las implicaciones ambientales y sociales derivadas de los cambios en el uso del suelo, específicamente en lo que respecta a la conservación del parque y el bienestar de las comunidades locales. Se observa que las actividades antrópicas agrícolas, ganaderas y turísticas han ocasionado una degradación ecosistémica, a consecuencia de los procesos de fragmentación y transformación en las coberturas arbóreas y procesos de erosión del suelo, la agricultura es la principal actividad que ocasiona un cambio total en la estructura natural del paisaje, erradicando los ecosistemas de bosque (herbáceo, arbustivo y arbóreo), ocasionando una degradación irreversible en los componentes naturales del territorio y afectando severamente el ciclo biogeoquímico del parque. Otra actividad antrópica es el desarrollo y crecimiento de actividades, estas han tenido un impacto ambiental negativo en el ambiente, derivado del acelerado y desordenado crecimiento de algunas zonas del parque con el fin de actividades turísticas y recreativas.

Otra implicación social es la inmigración resultado de la falta de empleo en las zonas rurales de México, lo que afecta de manera directa al parque, fomentando actividades informales que se encuentran dentro del sector terciario (comercio al por mayor, comercio al por menor y transportes), sean las principales fuentes de empleo dentro de los municipios que conforman el parque.

Los bajos salarios es otra implicación social, debido a la ubicación geográfica del parque, el salario mínimo es de \$ 73.04 diario, se puede determinar que el 45.08% de la población que habita dentro del parque, está considerada vulnerable económicamente.

Se identificaron las implicaciones sociales en los servicios básicos de agua, drenaje y luz. A medida que los servicios básicos se incrementan y mejoran, los deterioros ambientales hacia los ecosistemas aumentan, las especies arbóreas son eliminadas para su construcción o ampliación.

4. RESULTADOS

4.1 ANÁLISIS ESPACIOTEMPORAL SOBRE LOS CAMBIOS DE COBERTURA Y USO DEL SUELO POR CADA ECOSISTEMA EN EL PERIODO ESTUDIADO (2014-2018).

La descripción de los procesos de cambio del Parque Otomí – Mexica, Estado de México se realizó a partir de la matriz de cambios, los indicadores e índices de cambio, las tasas de cambio y el mapa de cambios, (ver figura, 2)

En la matriz de cambios se observa que, en el año 2014 el bosque de pino tenía una superficie de 21,422 ha, para el año 2018 solamente se conservaron (permanecieron) 18,049.43 ha, producto del proceso de deforestación. Por tanto, se eliminaron 3,373 ha de bosque de pino, las cuales fueron ocupadas por otras categorías: bosque de oyamel (248.59 ha), bosque de pino – encino (128.32 ha), bosque mesófilo de montaña (61.85 ha), agricultura de temporal (1,534.45 ha), pastizal inducido (1,395.02 ha) y agricultura de riego (4.34 ha).

El bosque de pino también experimentó un proceso de revegetación, acción que coadyuvó, al incremento de la superficie conservada, es decir a 18,049.43 ha de bosque de pino que pertenecían al área conservada (permanencia), se adicionaron 5,286 ha de superficie recuperada, de las cuales pertenecían a bosque de encino 114 ha, bosque de oyamel 2712 ha, bosque de pino – encino 1028 ha, bosque mesófilo de montaña 45 ha, agricultura de temporal 856 ha, asentamientos humanos 0.10 ha, pastizal inducido 251 ha y agricultura de riego 280 ha, de superficie total para el año 2018.

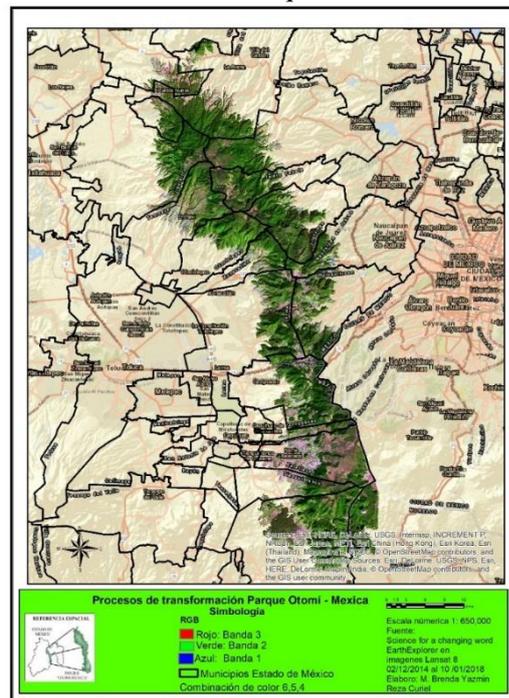
A pesar de que las categorías de bosque de pino experimento un proceso de revegetación, el área correspondiente a la deforestación fue mayor (casi el doble de la superficie recuperada).

Por su parte, las categorías de bosque de encino, bosque de oyamel, bosque de pino – encino, bosque mesófilo de montaña, agricultura de temporal, asentamientos humanos, pastizal inducido y agricultura de riego, registraron un notable incremento en la superficie, a pesar de la presencia de procesos vinculados con el ascenso y descenso en la cobertura que comprende a cada una de estas. Este incremento puede atribuirse a actividades relacionadas con la apertura de nuevos reservorios de agua (cuerpos de agua artificiales: bordos, presas) y procesos asociados a la urbanización, revegetación y expansión de las fronteras agropecuarias (tabla, 16)

IDENTIFICACIÓN DE USOS DEL SUELO EN EL PARQUE OTOMÍ MEXICA A TRAVÉS DE MATRICES DE CONFUSIÓN 2014 Y 2018

FIGURA 2

Mapa de Proceso de cambios del Parque Otomí – Mexica 2014 – 2018.



Fuente: elaboración propia con base en Science for changing Word Earth Explorer en imágenes Landsat 8 2014 -2018

4.2 EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DE LOS MAPAS USO DEL SUELO DEL PARQUE OTOMÍ – MEXICA 2014 Y 2018.

Los mapas fueron validados mediante puntos de verificación (sitios de muestreo). Para el mapa del año 2014 se registraron un total de 450 puntos, de los cuales 415 coincidieron con las categorías de la leyenda del mapa y 35 pertenecieron a una categoría diferente (Tabla, 5). Para el año 2018, del total de 450 puntos de muestreo, de los cuales 407 coinciden con las categorías de la leyenda del mapa y 43 pertenecieron a una categoría diferente (Tabla, 6).

En el siguiente cuadro se observan los mismos elementos descritos en la tabla 7 y 8, es decir la comparación entre las categorías clasificadas en el mapa (Verdad imagen) y las clases de referencia recopiladas en campo (Verdad terreno), sólo que los valores se encuentran expresados en proporciones (Tabla, 9 y 10).

Los valores de las tablas 9 y 10 anteriores son el resultado de la aplicación del método Card (1982), es decir los coeficientes que comprenden a estos son el producto de las correcciones o ajustes a los cuales se sometieron los datos incluidos en los cuadros anteriores. La suma de la proporción de cada una de las categorías correspondientes a la verdad imagen es igual a la proporción de la categoría representada en el mapa. (Tabla, 11 y 12).

En la tabla 13 se muestran los datos correspondientes a los índices de confiabilidad e intervalos de confianza de los mapas clasificados. Se obtuvo una fiabilidad global de 92.22 % y un intervalo de confianza de 4.47% para el mapa del año 2014. La categoría de bosque mesófilo de montaña registró el mayor error de comisión (20%), el bosque de encino, bosque mesófilo de montaña y agricultura de temporal fueron las categorías que registraron los mayores errores de omisión con (20%). (Tabla, 14) muestran los datos correspondientes a los índices de confiabilidad e intervalos de confianza de los mapas clasificados, 2018 se obtuvo una confiabilidad global de 90.44% y un intervalo de confianza de 7.48%. La categoría de agricultura de temporal fue la que tiene mayor error de comisión 30.35%, mientras que en la categoría de error de omisión el bosque de encino obtuvo el 24%.

En la tabla 15 se observan los índices de confiabilidad e intervalos de confianza calculados a partir de datos incluidos en las matrices de confusión corregidas o ajustadas por el método Card

(1982). Se obtuvo una confiabilidad global de 94.44% y un intervalo de confianza de 3.12% para el año 2014, el bosque de pino – encino registro un error de comisión de 16.66% y el bosque de oyamel registro un error de omisión de 20%. (Tabla, 16) se observan los índices de confiabilidad e intervalos de confianza calculados a partir de datos incluidos en las matrices de confusión corregidas o ajustadas por el método Card, para el mapa del año 2018 se registro una confiabilidad global de 89.89% y un intervalo de confianza de 5.5%. La categoría que registro mayor error de comisión fue el bosque de encino con el 28.58%, mientras que el error de omisión más alto fue el bosque de oyamel con el 36.37%.

En relación a los indicadores de cambio, el 82.38% (87,226.96 ha) del territorio que comprende el Parque Otomí – Mexica permaneció estable durante el periodo 2014 – 2018, mientras el 34.88% (36,936.26ha) presentó cambios en las coberturas y usos de suelo que caracterizan a este espacio geográfico. De este último porcentaje. 29.73% (31,478.85ha) corresponde a intercambios entre categorías y sólo 5.06 % (5,366.32 ha) representa el cambio neto. En términos de ganancias y pérdidas, el bosque de pino encino, pastizal inducido y bosque de pino fueron las categorías perdedoras con 4.45% (4,714.71 ha), 3.19% (3,385.94 ha) y 3.18% (3,372.57 ha). Mientras que las clases ganadoras fueron bosque de pino, bosque de pino – encino, pastizal inducido con 4.99% (5,285.97 ha), 3.98% (4,216.48 ha), 3.69% (3,915.75 ha) respectivamente. El análisis del cambio neto permitió identificar que la cobertura del bosque de pino disminuyó 5.06% (5,366.32 ha) respecto a la que tenía en 2014; mientras que las categorías agricultura de riego, pastizal inducido, bosque de pino – encino, bosque de oyamel, bosque de encino, agricultura de temporal, bosque mesófilo de montaña y asentamientos humanos, incrementaron su superficie en 1.54% (1,635.84 ha), 0.50% (529.81 ha), 0.47% (425.6 ha), 0.40% (425.6 ha), 0.12% (133.07 ha), 0.11% (123.4 ha), 0.09% (103.19 ha) y 0.003% (3.78 ha) respectivamente.

Por lo tanto, se determina que los valores correspondientes al cambio neto pueden brindar una aproximación a la interpretación de los cambios producidos. Sin embargo, no es suficiente para establecer una visión clara sobre la dinámica territorial de un determinado espacio geográfico, pues estos datos no consideran las áreas del intercambio producidas entre coberturas, ni tampoco el cambio total que se registró durante el periodo de estudio; es decir, se puede saber cuánta superficie cambio con respecto al año de origen y en qué sentido, pero no se puede saber si esa cobertura presentó modificaciones espaciales al interrelacionarse con otras, ni a cuánto ascendió el valor total de ese cambio al final del periodo. Por esta razón, es necesario considerar el cálculo de la ganancia, la pérdida y el intercambio para cada categoría (López y Plata, 2009 en Camacho, 2019). Para comprender lo anterior, se puede considerar como ejemplo las categorías bosque de pino – encino, pastizal inducido y bosque de pino. En ambas clases se observa que el cambio total (real) resultó ser superior al cambio neto, pues el intercambio de la superficie (7.96% para bosque de pino - encino, 6.39% para pastizal inducido y 6.37% para bosque de pino) con otras categorías, producto de la ganancia y pérdida, determinó su variación espacial. Considerando esto, ambas categorías resultaron ser las que más cambios registraron en el Parque Otomí Mexica con el bosque de pino – encino 8.43% (8,931.19 ha), pastizal inducido 8.18% (7,301.69 ha) y bosque de pino 8.17% (8,658.54 ha) para pastizal inducido (tabla, 16).

IDENTIFICACIÓN DE USOS DEL SUELO EN EL PARQUE OTOMÍ MEXICA A TRAVÉS DE MATRICES DE CONFUSIÓN 2014 Y 2018

TABLA 5
Matriz de confusión 2014

Año 2014		Verdad imagen (clases del mapa)									
		Bosque de pino	Bosque de encino	Bosque de oyamel	Bosque pino-encino	Bosque mesófilo de montaña	Agricultura de temporal	Asentamientos humanos	Pastizal inducido	Agricultura de riego	Total Verdad terreno
Verdad terreno (Clases de referencia)	Bosque de pino	50	0	0	0	0	0	0	0	0	50
	Bosque de encino	0	40	0	0	10	0	0	0	0	50
	Bosque de oyamel	0	0	45	5	0	0	0	0	0	50
	Bosque encino - pino	0	0	0	50	0	0	0	0	0	50
	Bosque mesófilo de montaña	0	0	10	0	40	0	0	0	0	50
	Agricultura de temporal	0	0	0	0	0	40	0	0	10	50
	Asentamientos humanos	0	0	0	0	0	0	50	0	0	50
	Pastizal inducido	0	0	0	0	0	0	0	50	0	50
	Agricultura de riego	0	0	0	0	0	0	0	0	50	50
Total verdad imagen		50	40	55	55	50	40	50	50	60	450

Fuente: elaboración propia, con base en (USDA, 1995; Mas et al., 2003; Franco et al., 2006 en Camacho, 2019)

TABLA 6
Matriz de confusión 2018

Año 2018		Verdad imagen (clases del mapa)									
		Bosque de pino	Bosque de encino	Bosque de oyamel	Bosque pino-encino	Bosque de galería	Agricultura de temporal	Asentamientos humanos	Pastizal inducido	Agricultura de riego	Total Verdad terreno
Verdad terreno (Clases de referencia)	Bosque de pino	47	0	0	3	0	0	0	0	0	50
	Bosque de encino	0	38	0	0	0	12	0	0	0	50
	Bosque de oyamel	0	7	43	0	0	0	0	0	0	50
	Bosque encino - pino	0	5	0	45	0	0	0	0	0	50
	Bosque mesófilo de montaña	0	0	0	0	50	0	0	0	0	50
	Agricultura de temporal	0	0	0	0	0	39	0	0	11	50
	Asentamientos humanos	0	0	0	0	0	0	50	0	0	50
	Pastizal inducido	0	0	0	0	0	0	0	50	0	50
	Agricultura de riego	0	0	0	0	0	5	0	0	45	50
	Total verdad imagen		47	50	43	48	50	56	50	50	56

Fuente: elaboración propia, con base en (USDA, 1995; Mas et al., 2003; Franco et al., 2006 en Camacho, 2019)

IDENTIFICACIÓN DE USOS DEL SUELO EN EL PARQUE OTOMÍ MEXICA A TRAVÉS DE MATRICES DE CONFUSIÓN 2014 Y 2018

TABLA 7
Matriz de confusión o de error expresada en proporción 2014

Año 2014		Verdad imagen (clases del mapa)									
		Bosque de pino	Bosque de encino	Bosque de oyamel	Bosque pino-encino	Bosque mesófilo de montaña	Agricultura de temporal	Asentamientos humanos	Pastizal inducido	Agricultura de riego	Total Verdad terreno
Verdad terreno	Bosque de pino	0.11	0	0	0	0	0	0	0	0	0.11
	Bosque de encino	0	0.099	0	0	0.011	0	0	0	0	0.11
	Bosque de oyamel	0	0	0.088	0.022	0	0	0	0	0	0.11
	Bosque pino-encino	0	0	0	0.11	0	0	0	0	0	0.11
	Bosque mesófilo de montaña	0	0	0.011	0	0.099	0	0	0	0	0.11
	Agricultura de temporal	0	0	0	0	0	0.099	0	0	0.011	0.11
	Asentamientos humanos	0	0	0	0	0	0	0.11	0	0	0.11
	Pastizal inducido	0	0	0	0	0	0	0	0.11	0	0.11
	Agricultura de riego	0	0	0	0	0	0	0	0	0.11	0.11
Total verdad imagen		0.11	0.099	0.099	0.132	0.11	0.099	0.11	0.11	0.121	1.00
Proporción representada en el mapa		0.135	0.045	0.12	0.099	0.035	0.250	0.09	0.055	0.170	1.00

Fuente: elaboración propia, con base en (Mas y Couturier, 2011 en Camacho, 2019)

TABLE 8
 Matriz de confusión o de error expresada en proporción 2018

Año 2018		Verdad imagen (clases del mapa)									Total Verdad terreno
		Bosque de pino	Bosque de encino	Bosque de oyamel	Bosque pino-encino	Bosque mesófilo de montaña	Agricultura de temporal	Asentamientos humanos	Pastizal inducido	Agricultura de riego	
Verdad terreno	Bosque de pino	0.08	0	0	0.03	0	0	0	0	0	0.11
	Bosque de encino	0	0.10	0	0	0	0.01	0	0	0	0.11
	Bosque de oyamel	0	0.04	0.07	0	0	0	0	0	0	0.11
	Bosque pino-encino	0	0	0	0.11	0	0	0	0	0	0.11
	Bosque mesófilo de montaña	0	0	0	0	0.11	0	0	0	0	0.11
	Agricultura de temporal	0	0	0	0	0	0.09	0	0	0.02	0.11
	Asentamientos humanos	0	0	0	0	0	0	0.11	0	0	0.11
	Pastizal inducido	0	0	0	0	0	0	0	0.11	0	0.11
	Agricultura de riego	0	0	0	0	0	0	0	0	0.11	0.11
Total verdad imagen		0.08	0.14	0.07	0.14	0.11	0.10	0.11	0.11	0.13	1.00
Proporción representada en el mapa		0.035	0.05	0.17	0.068	0.135	0.043	0.029	0.39	0.08	1.00

Fuente: elaboración propia, con base en (Mas y Couturier, 2011 en Camacho, 2019)

IDENTIFICACIÓN DE USOS DEL SUELO EN EL PARQUE OTOMÍ MEXICA A TRAVÉS DE MATRICES DE CONFUSIÓN 2014 Y 2018

TABLA 9
Matriz de confusión o de error expresada en proporción y corregidas en proporción por el método de Card (2014)

Año 2014		Verdad imagen (clases del mapa)									
		Bosque de pino	Bosque de encino	Bosque de oyamel	Bosque pino-encino	Bosque mesófilo de montaña	Agricultura de temporal	Asentamientos humanos	Pastizal inducido	Agricultura de riego	Total Verdad terreno
Verdad terreno (Clases de referencia)	Bosque de pino	0.135	0	0	0	0	0	0	0	0	0.135
	Bosque de encino	0	0.045	0	0	0.005	0	0	0	0	0.05
	Bosque de oyamel	0	0	0.080	0.020	0	0	0	0	0	0.100
	Bosque pino-encino	0	0	0	0.070	0	0	0	0	0	0.070
	Bosque mesófilo de montaña	0	0	0.040	0	0.025	0	0	0	0	0.065
	Agricultura de temporal	0	0	0	0	0	0.250	0	0	0.020	0.270
	Asentamientos humanos	0	0	0	0	0	0	0.090	0	0	0.090
	Pastizal inducido	0	0	0	0	0	0	0	0.055	0	0.055
	Agricultura de riego	0	0	0	0	0	0	0	0	0.15	0.150
Total verdad imagen		0.135	0.045	0.120	0.099	0.035	0.250	0.09	0.055	0.170	1.00
Proporción representada en el mapa		0.135	0.045	0.120	0.099	0.035	0.250	0.09	0.055	0.170	1.00

Fuente: elaboración propia, con base en (Mas y Couturier, 2011 en Camacho, 2019)

TABLA 10
Matriz de confusión o de error expresada en proporción y corregidas en proporción por el método de Card (2018)

Año 2018		Verdad imagen (clases del mapa)									
		Bosque de pino	Bosque de encino	Bosque de oyamel	Bosque pino-encino	Bosque mesófilo de montaña	Agricultura de temporal	Asentamientos humanos	Pastizal inducido	Agricultura de riego	Total Verdad terreno
Verdad terreno	Bosque de pino	0.035	0	0	0.020	0	0	0	0	0	0.055
	Bosque de encino	0	0.030	0	0	0	0.020	0	0	0	0.050
	Bosque de oyamel	0	0.010	0.170	0	0	0	0	0	0	0.180
	Bosque pino-encino	0	0.010	0	0.048	0	0	0	0	0	0.058
	Bosque mesófilo de montaña	0	0	0	0	0.135	0	0	0	0	0.135
	Agricultura de temporal	0	0	0	0	0	0.021	0	0	0.03	0.051
	Asentamientos humanos	0	0	0	0	0	0	0.029	0	0	0.029
	Pastizal inducido	0	0	0	0	0	0	0	0.390	0	0.390
	Agricultura de riego	0	0	0	0	0	0.002	0	0	0.050	0.052
Total verdad imagen		0.035	0.050	0.170	0.068	0.135	0.043	0.029	0.39	0.080	1.00
Proporción representada en el mapa		0.035	0.050	0.170	0.068	0.135	0.043	0.029	0.39	0.080	1.00

Fuente: elaboración propia, con base en (Mas y Couturier, 2011 en Camacho, 2019)

IDENTIFICACIÓN DE USOS DEL SUELO EN EL PARQUE OTOMÍ MEXICA A TRAVÉS DE MATRICES DE CONFUSIÓN 2014 Y 2018

TABLA 11
Índice de confiabilidad e intervalos de confianza (matriz de confusión sin correcciones o ajustes) 2014

Año 2014	Verdad imagen (clases del mapa)										Confiabilidad global (%)	Intervalo de confianza (%)
	Bosque de pino %	Bosque de encino %	Bosque de oyamel %	Bosque pino-encino %	Bosque mesófilo de montaña %	Agricultura de temporal %	Asentamientos humanos %	Pastizal inducido %	Agricultura de riego %			
Confiabilidad del usuario	100	100	81.81	90.90	80.00	100	100	100	83.33	92.22	4.47	
Error de comisión	0	0	18.18	0.09	20	0	0	0	16.66			
Intervalo de confianza del usuario	0	0	0.01	9.01	0	0	0	0	0.01			
Confiabilidad de productor	100	80	90	100	80	80	100	100	100			
Error de omisión	0	20	10	0	20	20	0	0	0			
Intervalo de confianza del productor	0	0	0.02	0	0.02	0.02	0	0	0			

Fuente: elaboración propia, con base en (Mas y Couturier, 2011 en Camacho, 2019)

TABLA 12
Índice de confiabilidad e intervalos de confianza (matriz de confusión sin correcciones o ajustes) 2018

Año 2018	Verdad imagen (clases del mapa)										Confiabilidad global (%)	Intervalo de confianza (%)
	Bosque de pino %	Bosque de encino %	Bosque de oyamel %	Bosque pino-encino %	Bosque mesófilo de montaña %	Agricultura de temporal %	Asentamientos humanos %	Pastizal inducido %	Agricultura de riego %			
Confiabilidad del usuario	100	76	100	93.75	100	69.64	100	100	80.35	90.44	7.48	
Error de comisión	0	24	0	6.25	0	30.35	0	0	19.64			
Intervalo de confianza del usuario	0	31	0	14.05	0	0	0	0	15			
Confiabilidad de productor	94	76	86	90	100	78	100	100	90			
Error de omisión	6	24	14	10	0	22	0	0	10			
Intervalo de confianza del productor	0	0.05	0	0.020	0	0	0.070	0	0.04			

Fuente: elaboración propia, con base en (Mas y Couturier, 2011 en Camacho, 2019)

TABLA 13

Índice de confiabilidad e intervalos de confianza (matriz de confusión corregidas por el método Card) 2014

Año 2014	Verdad imagen (clases del mapa)										Confiabilidad global (%)	Intervalo de confianza (%)
	Bosque de pino %	Bosque de encino %	Bosque de oyamel %	Bosque pino-encino %	Bosque mesófilo de montaña %	Agricultura de temporal %	Asentamientos humanos %	Pastizal inducido %	Agricultura de riego %			
Confiabilidad del usuario	100	100	88.88	83.33	90	100	100	100	90	94.44	3.12	
Error de comisión	0	0	11.11	16.66	10.00	0	0	0	10			
Intervalo de confianza del usuario	0	0	11.00	8.90	5.9	0	0	0	5.90			
Confiabilidad de productor	100	90	80	100	90	90	100	100	100			
Error de omisión	0	10	20	0	10.00	10.00	0	0	0			
Intervalo de confianza del productor	0	0	0	0	0.005	0	0	0	0.007			

Fuente: elaboración propia, con base en (Mas y Couturier, 2011 en Camacho, 2019)

TABLA 14

Índice de confiabilidad e intervalos de confianza (matriz de confusión corregidas por el método Card) 2018

Año 2018	Verdad imagen (clases del mapa)										Confiabilidad global (%)	Intervalo de confianza (%)
	Bosque de pino %	Bosque de encino %	Bosque de oyamel %	Bosque pino-encino %	Bosque mesófilo de montaña %	Agricultura de temporal %	Asentamientos humanos %	Pastizal inducido %	Agricultura de riego %			
Confiabilidad del usuario	100	71.42	100	78.57	100	81.81	100	100	84.61	89.89	5.5	
Error de comisión	0	28.58	0	21.43	0	18.19	0	0	15.39			
Intervalo de confianza del usuario	0	14.05	0	10.05	0	9.05	0	0	7.09			
Confiabilidad de productor	72.72	90.90	63.63	100	100	81.81	100	100	100			
Error de omisión	27.28	9.1	36.37	0	0	18.19	0	0	0			
Intervalo de confianza del productor	0	0.025	0	0	0	0	0	0	0.05			

Fuente: elaboración propia, con base en (Mas y Couturier, 2011 en Camacho, 2019)

IDENTIFICACIÓN DE USOS DEL SUELO EN EL PARQUE OTOMÍ MEXICA A TRAVÉS DE MATRICES DE CONFUSIÓN 2014 Y 2018

TABLA 15
Matriz de cambios del Parque Otomí – Mexica Estado de México. Periodo 2014 – 2018

Fecha 1 (2014)											
		Bosque de pino	Bosque de encino	Bosque de oyamel	Bosque pino-encino	Bosque mesófilo de montaña	Agricultura de temporal	Asentamientos humanos	Pastizal inducido	Agricultura de riego	Total Año 2018
Fecha 2018	Bosque de pino	18,049.43	113.98	2,711.90	1,027.97	45.14	855.95	0.10	250.59	280.34	23,335.4
	Bosque de encino	0.00	3,729.34	30.65	218.87	0.00	37.96	0.00	0.00	130.25	4,147.07
	Bosque de oyamel	248.59	0.00	27,506.00	1,248.15	0.21	273.25	0.11	582.34	115.75	29,974.4
	Bosque pino-encino	128.32	0.17	25.75	4,768.29	0.00	945.89	0.00	2,476.46	639.89	8984.77
	Bosque mesófilo de montaña	61.85	28.05	0.00	0.00	204.50	0.00	0.00	0.00	58.79	353.19
	Agricultura de temporal	1,534.45	40.28	20.49	320.00	0.00	27,179.8	0.11	75.47	0.00	29,170.6
	Asentamientos humanos	0.00	0.01	0.90	1.20	0.00	1.05	10.54	1.08	0.00	14.78
	Pastizal inducido	1,395.02	102.06	89.06	1898.34	0.15	0.00	0.14	5,914.06	430.98	9829.81
	Agricultura de riego	4.34	0.29	15.25	0.18	0.00	0.10	0.00	0.00	45.00	65.16
	Total año 2014	21,422	4,014	30,400	9,483	250.00	29,294	11	9,300	1,701	105875

Fuente: elaboración propia, con base (Mas y Couturier, 2011 en Camacho, 2019)

TABLA 16
Indicadores de cambio del Parque Otomí – Mexica Estado de México.

	Bosque de pino	Bosque de encino	Bosque de oyamel	Bosque pino-encino	Bosque mesófilo de montaña	Agricultura de temporal	Asentamientos humanos	Pastizal inducido	Agricultura de riego	Total Año 2018
Área 2014 (ha)	21,422	4,014	30,400	9,483	250	29,294	11	9,300	1,701	105875
%	20.23	3.79	28.71	8.95	0.23	27.66	0.01	8.78	3.21	100.00
Área 2018 (ha)	23,335.4	4,147.07	29,974.40	8,984.77	353.19	29,170.60	14.60	9,829.81	65.16	105,875.00
%	22.04	3.91	28.31	8.48	0.33	27.55	0.013	9.28	0.06	100.00
Persistencia	18,049.43	3,729.34	27,506.00	4,768.29	204.50	27,179.80	10.54	5,914.06	45.00	87,226.96
%	17.04	3.52	25.97	4.50	0.19	25.67	0.009	5.58	0.04	82.38
Pérdidas	3,372.57	284.66	2,894.00	4,714.71	45.50	2,114.20	0.46	3,385.94	1,656.00	18,468.04
%	3.18	0.26	2.73	4.45	0.04	1.99	0.0004	3.19	1.56	17.44
Ganancias	5,285.97	417.73	2,468.40	4,216.48	148.69	1,990.80	4.24	3,915.75	20.16	18,468.22
%	4.99	0.39	2.33	3.98	0.14	1.88	0.004	3.69	0.01	17.44
Cambio total	8,658.54	702.39	5,362.40	8,931.19	194.19	4,105.00	4.7	7,301.69	1,676.16	36,936.26
%	8.17	0.66	5.06	8.43	0.18	3.87	0.004	8.18	1.58	34.88
Cambio Neto	1,913.4	133.07	425.60	498.23	103.19	123.40	3.78	529.81	1,635.84	5,366.32
%	1.80	0.12	0.40	0.47	0.09	0.11	0.003	0.50	1.54	5.06
Intercambios	6,745.14	569.32	4,936.80	8,432.87	0	3,981.60	0.92	6,771.88	40.32	31,478.85
%	6.37	0.53	4.66	7.96	0	3.76	0.0008	6.39	0.03	29.73

Fuente: elaboración propia, con base en (Mas y Couturier, 2011 en Camacho, 2019)

IDENTIFICACIÓN DE USOS DEL SUELO EN EL PARQUE OTOMÍ MEXICA A TRAVÉS DE MATRICES DE CONFUSIÓN 2014 Y 2018

4.3 COMPARACIÓN CON OTRA ÁREA NATURAL PROTEGIDA Y ALGUNAS REGIONES DEL ESTADO DE MÉXICO.

Con el fin de identificar patrones y tendencias comunes en la gestión y conservación en este parque, se realizó una búsqueda sobre cambios de uso del suelo en otra Área Natural Protegida (ANP) Parque Nacional Lagunas de Zempoala y algunas regiones como: Donato Guerra, San José del Rincón, Villa de Allende y Villa Victoria del Estado de México.

Los patrones y tendencias de cambios de uso de suelo se registraron con un decremento en el bosque de oyamel en el ANP Parque Otomí Mexica del Estado de México con 425.6 hectáreas y en el ANP Parque Nacional Lagunas de Zempoala también se registró un decremento en el mismo uso de suelo bosque de oyamel con 22 hectáreas.

Se identificó un patrón y tendencia de cambios de uso de suelo con un decremento en el bosque de pino - encino en el ANP Parque Otomí Mexica del Estado de México con 498.23 hectáreas y en el ANP Parque Nacional Lagunas de Zempoala también se registró un decremento en el mismo uso de suelo bosque de pino – encino con 1 hectárea.

Se localizó un patrón y tendencia de cambios de uso de suelo con un decremento en la agricultura de temporal en el ANP Parque Otomí Mexica del Estado de México con 123.4 hectáreas, en el ANP Parque Nacional Lagunas de Zempoala, también se registró un decremento en el mismo uso de suelo bosque de agricultura de temporal con 7 hectáreas, también se identificó un decremento en el mismo uso de suelo de agricultura de temporal en los municipios de Donato Guerra, San José del Rincón, Villa de Allende y Villa Victoria con 8,934 hectáreas. Se identifica que se requiere de gestión y conservación en el bosque de oyamel, bosque de pino – encino y agricultura de temporal, para mitigar los impactos negativos ocasionados en estos usos de suelo.

Se identificó un patrón y tendencia de cambios de uso de suelo con un incremento en el pastizal inducido en el ANP Parque Otomí Mexica del Estado de México con 529.81 hectáreas y en el ANP Parque Nacional Lagunas de Zempoala también se registró un incremento en el mismo uso de suelo pastizal inducido con 37 hectáreas.

Se localizó un patrón y tendencia de cambios de uso de suelo con un incremento en los asentamientos humanos en el ANP Parque Otomí Mexica del Estado de México con 3.78 hectáreas, en el ANP Parque Nacional Lagunas de Zempoala también se registró un incremento en el mismo uso de suelo de asentamientos humanos con 887 hectáreas, también se identificó un incremento en el mismo uso de suelo de asentamientos humanos en los municipios de Donato Guerra, San José del Rincón, Villa de Allende y Villa Victoria con 982 hectáreas. Se identificó un deterioro ambiental tanto en el pastizal inducido como en los asentamientos humanos directamente en los ecosistemas de las ANP y las regiones mencionadas del Estado de México. ((Tabla 17)

Tabla 17
Patrones y Tendencias comunes en la gestión y conservación

Evaluación y Modelación de Servicios Ecosistémicos en el ANP Parque Otomí Mexica del Estado de México. Propuesta Metodológica. (Reza , 2022)		Servicios Ecosistémicos de Soporte en el ANP Parque Nacional Lagunas de Zempoala. Su Evolución Desde Las Ciencias Ambientales. (Medina, 2021)		Servicios Ecosistémicos Captura de Carbono y Recarga de Acuíferos En Cuatro Municipios al Poniente del Estado de México: (2000-2018) (Donato Guerra, San José del Rincón, Villa de Allende y Villa Victoria). (Camacho, 2021)	
2014 – 2018		2010 - 2019		2000 - 2018	
Bosque de oyamel	Decremento 425.6 ha.	Bosque de oyamel	Decremento 22 ha.	Bosque de oyamel	Incremento 2,834 ha.

Bosque pino - encino	Decremento 498.23 ha.	Bosque de pino - encino	Decremento 1 ha.	Bosque de pino - encino	Incremento 1,147 ha.
Agricultura de temporal	Decremento 123.4 ha.	Agricultura de temporal	Decremento 7 ha.	Agricultura de temporal	Decremento 8,934 ha.
Pastizal inducido	Incremento 529.81 ha.	Pastizal inducido	Incremento 37 ha.	Pastizal	Decremento 1,969 ha.
Asentamientos humanos	Incremento 3.78 ha.	Asentamientos humanos	Incremento 887 ha.	Asentamientos humanos	Incremento 982 ha.

Fuente: elaboración propia con base en (Camacho, 2021; Medina, 2021 y Reza, 2022)

4.4 INCLUSIÓN DE VARIABLES AMBIENTALES

Las variables ambientales que se ocuparan en la investigación fueron: clima, precipitación, temperatura, altitud y pendiente, y las variables morfológicas: grosor promedio de los árboles y altura de los árboles.

Entre las variables adicionales se encuentra la biodiversidad de flora y fauna que se desarrolla de manera natural de acuerdo a los datos obtenidos del Programa de Conservación y Manejo del año 2009, en estos espacios habitan alrededor de 246 especies de vertebrados de los cuales 42 son considerados endémicos.

Variable adicional hidrológica. Alteración del ciclo geohidrológico por represas y retención de los escurrimientos durante la época de lluvias, disminución de la infiltración y recarga de acuíferos por pérdida de cubierta vegetal.

Variable adicional cambio climático. Debido a las condiciones meteorológicas, para el año 2014 se registró mayor precipitación, temperatura y evapotranspiración. Para el año 2018 en los estados del noreste, centro y sur de México se presentó la canícula con lluvias por debajo del promedio y temperaturas por arriba del promedio en estas regiones. En México, el trimestre se caracterizó con lluvias por arriba del promedio en la mayor parte del territorio nacional asociada a la actividad ciclónica, principalmente del Pacífico Oriental, y en menor medida, por el inicio de la temporada de sistemas frontales. Debido a su ubicación geográfica, la precipitación y temperatura en el área de estudio están influenciados por los ciclones antes mencionados; y de igual manera alcanzan a llegar rachas de fenómenos como lo son El Niño y La Niña, así como otros fenómenos climatológicos.

5. CONCLUSIONES

Derivado de la intersección de imágenes de satélite 2014 y 2018, con la combinación de bandas 6, 5 y 4 dan como resultado los procesos de cambios del área de estudio, representando cartográficamente los cambios que han sufrido con 11,296.32 hectáreas, lo que representa el 11% del área de estudio, los municipios que representaron mayores cambios fueron Xalatlaco, Ocuilan, Tianguistenco, Ocoyoacac, Huixquilucan, Morelos, Villa del Carbón, Temoaya 2, ver (figura, 2). Una aportación de esta investigación fue la actualización del cambio de uso de suelo en el Parque Otomí Mexica a través de matrices de confusión, para obtener el índice de confiabilidad de intervalos de confianza para cada ecosistema. De los municipios antes mencionados solamente son porciones, pues una parte de ellos está conformada por infraestructura urbana.

Con el fin de proponer recomendaciones específicas para la gestión y conservación del parque se plantean las siguientes estrategias: para mitigar los impactos negativos identificados como los cambios de uso del suelo menos sostenibles se propone: identificar los usos potenciales del suelo y los usos adecuados e inadecuados del territorio.

Con base en los resultados obtenidos se recomienda que la población implemente en la zona de estudio actividades de conservación y reforestación para que la evapotranspiración aumente y haya

IDENTIFICACIÓN DE USOS DEL SUELO EN EL PARQUE OTOMÍ MEXICA A TRAVÉS DE MATRICES DE CONFUSIÓN 2014 Y 2018

una mayor recarga del acuífero y se conserve la permeabilidad del suelo para que se recuperen los suelos erosionados y los usos del suelo se conserven.

Entre las estrategias sociales se recomienda que la población realice una gestión y conservación adecuada de los ecosistemas que conforman el territorio del parque ya que es una fuente valiosa de componentes naturales que provee diferentes servicios ecosistémicos como: agua, oxígeno, alimentos, materias primas para la elaboración de medicamentos, herramientas de trabajo, entre otras, que son indispensables para el bienestar de las poblaciones. Se recomienda una eficiente administración ecológica, ya que el parque proporciona múltiples beneficios para el funcionamiento de mercados locales y regionales, derivado de que los productos de las actividades agrícolas, ganaderas y económicas se desarrollan dentro del territorio. Se recomienda una administración eficiente en lo ecológico, dado que el parque desarrolla una importante función para la flora y fauna que alberga dentro de sus límites.

6. BIBLIOGRAFÍA

- CAMACHO REYES. (2021) “Servicios Ecosistémicos Captura De Carbono Y Recarga De Acuíferos En Cuatro Municipios Al Poniente Del Estado De México: (2000-2018). Tesis de Doctorado en Ciencias Ambientales, Toluca México.
- CAMACHO SANABRIA. (2019) “Alcance descriptivo de los cambios de cobertura y uso de suelo. El caso de la porción surponiente del Estado de México (1989 – 2009)”. Universidad de Quintana Roo, México.
- CARD, H. D. (1982) Using Known map category marginal frequencies to improve estimates of thematic map accuracy. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 48 (3), 431-439
- CHUVIECO, SALINERO. (1996) *Fundamentos de Teledetección* (3ª. Edición) Madrid: Rialp.
- CHUVIECO, SALINERO. (2008). *Teledetección ambiental: la observación de la tierra desde el espacio* (3ra. Ed.) Barcelona: Ariel
- CONGALTON, RUSSELL. (1991) A review of assessing the accuracy of classification of remotely sensed data *Remote Sensing of Environment* 37 (1), 35-46.
- EASTMAN, R. (2012) *IDRISI Selva. Guía para SIG y Procesamiento de imágenes. Manual versión 17*. Argentina Clark Labs.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA INEGI, (2002). “Uso de suelo y vegetación, Serie III en México”. Consultado el 23 de diciembre de 2019 en: https://idegeo.centrogeo.org.mx/layers/geonode%3Ausv_serie3_gcs INEGI, México.
- INSTITUTO NACIONAL DE GEOGRAFÍA, ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA INEGI, (2015). *Guía para la interpretación de cartografía edafológica, Estado de México*.
- JENSEN JOHN. (1996) *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective* (2a. Ed.). NJ.:Prentice-Hall Upper Saddle River
- JUAN P.; CAMACHO S.; MAGALLANES M.; JUÁREZ T.; POZAS C.; PÉREZ S.; VILLEGAS M.; GARCÍA L.; VILCHIS O. (2017) “Análisis socioespacial, geográfico, ambiental y ecológico del Parque Otomí – Mexica Estado de México” (CEPANAF) del Gobierno del Estado de México y del Colegio de Ciencias Geográficas del Estado de México, A. C.
- MEDINA, SILVA. (2021) “Servicios Ecosistémicos De Soporte En El Área Natural Protegida Parque Nacional Lagunas De Zempoala. Su Evolución Desde Las Ciencias Ambientales” Tesis de Doctorado en Ciencias Ambientales, Toluca, México.
- REZA CURIEL, (2022) “Evaluación y Modelación de Servicios Ecosistémicos en el Parque Otomí Mexica del Estado de México. Propuesta Metodológica” Tesis de Doctorado en Ciencias Ambientales, Toluca, México.