



MULTI-TEMPORAL ANALYSIS OF LAND USE CHANGE IN THE MAGDALENA TEQUISISTLAN MICRO-BASIN, OAXACA, MEXICO †

[ANÁLISIS MULTITEMPORAL DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN LA MICROCUENCA MAGDALENA TEQUISISTLÁN, OAXACA, MÉXICO]

Juan Ángel García-Aguilar¹, Rufino Sandoval-García^{2*},
José Raymundo Enríquez-del Valle¹, Gerardo Rodríguez-Ortiz¹,
José Cristóbal Leyva López¹ and Judith Martínez de la Cruz¹

¹Tecnológico Nacional de México, Campus Valle de Oaxaca (ITVO). División de Estudios de Posgrado e Investigación. Ex hacienda de Nazareno, Xoxocotlán, Oaxaca, México. C.P. 71233; Email: gaja_9010@hotmail.com; jose.ev@voaxaca.tecnm.mx; gerardo.ro@voaxaca.tecnm.mx; jose.ll@voaxaca.tecnm.mx; judith.mc@voaxaca.tecnm.mx

²Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Departamento Forestal. Saltillo, Coahuila, México. C.P. 25315; Email: rufino.sandoval.garcia@gmail.com*

*Corresponding author

SUMMARY

Background: Tropical rainforests and temperate forests are the ecosystems most affected by land use change. In the state of Oaxaca, there is an annual deforestation rate of 17,796 ha yr⁻¹ due to the expansion of agricultural and livestock areas and human settlements. **Objective.** To perform a multitemporal analysis of the Magdalena Tequisistlán micro-basin, Tehuantepec, Oaxaca. **Methodology.** To estimate land use cover changes, using high-resolution images. Supervised classification was performed with Quantum Gis® 3.6.0 "Maidenhead" software and the K-Means algorithm was used for atmospheric correction, while concordance and precision were calculated with the Kappa index. **Results.** The Kappa index was 0.84, which means a high accuracy between the image classification and the observed reality. The area studied is 6,833.92 ha, which was analyzed over a period of 28 years, during which the agricultural areas decreased 256.35 ha with respect to the area of the initial period. **Implications.** The forest cover of the low deciduous forest decreased 653.56 ha, reflected in the increase of secondary vegetation, which went from 47.6 to 60.1 %, and the pine-oak forest decreased 31.82 ha. **Conclusions.** The decrease in agricultural areas can be attributed to the aging of the population, the increase in temperature and irregular rainfall, as well as reforestation by government programs in the study area.

Key words: Agriculture; pine-oak forest; satellite images; low deciduous forest; exchange rate; secondary vegetation.

RESUMEN

Antecedentes. Las selvas y bosques son los ecosistemas más afectados por el cambio de uso de suelo, en el estado de Oaxaca ocurre una tasa de deforestación anual de 17,796 ha año⁻¹ por la expansión de áreas agrícolas, pecuarias y asentamientos humanos. **Objetivo.** Realizar un análisis multitemporal de la microcuenca Magdalena Tequisistlán, Tehuantepec, Oaxaca. **Metodología.** Se estimaron los cambios de cobertura de uso del suelo, mediante imágenes de alta resolución. Se realizó la clasificación supervisada con el software Quantum Gis® 3.6.0 "Maidenhead" y para la corrección atmosférica se utilizó el algoritmo K-Means, mientras que la concordancia y precisión se calculó con el índice de Kappa. Para estimar los cambios de cobertura vegetal y de uso del suelo se generó una tabulación cruzada entre cuatro periodos. **Resultados.** El índice de Kappa fue de 0.84, lo que significa una precisión alta entre la clasificación de imágenes y la realidad observada. El área estudiada es de 6,833.92 ha, que se analizó en un periodo de 28 años, durante el cual, las áreas agrícolas disminuyeron 256.35 ha con respecto a la superficie del periodo inicial. **Implicaciones.** La cobertura forestal de la Selva Baja Caducifolia disminuyó 653.56 ha, reflejándose en el aumento de vegetación secundaria, el cual pasó de 47.6 a 60.1 % y el bosque de pino-encino disminuyó 31.82 ha. **Conclusiones.** La disminución de las zonas agrícolas puede atribuirse al envejecimiento de la población, al aumento de la temperatura y precipitaciones irregulares, así como reforestaciones por programas gubernamentales en la zona de estudio.

Palabras clave: Agricultura; bosque de pino-encino; imágenes satelitales; selva baja caducifolia; tasa de cambio; vegetación secundaria.

† Submitted May 23, 2024 – Accepted February 25, 2025. <http://doi.org/10.56369/tsaes.5653>



Copyright © the authors. Work licensed under a CC-BY 4.0 License. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ISSN: 1870-0462.

ORCID = J.Á. García-Aguilar: <http://orcid.org/0000-0001-9342-2154>; R. Sandoval-García: <http://orcid.org/0000-0003-4448-6172>; J.R. Enríquez-del Valle: <http://orcid.org/0000-0002-7700-3790>; G. Rodríguez-Ortiz: <http://orcid.org/0000-0003-0963-8046>; J.C. Leyva López: <http://orcid.org/0000-0002-7930-8467>; J. Martínez de la Cruz: <http://orcid.org/0000-0002-3292-4115>

INTRODUCCIÓN

En México, las especies más abundantes de la selva baja caducifolia corresponden a las familias Fabaceae, Rubiaceae, Burseraceae, Euphorbiaceae, Cactaceae, entre otras; y en los ecosistemas de pino-encino a Pinaceae y Fagaceae (Silva-Aparicio *et al.*, 2018; Flores-Morales *et al.*, 2022; Rodríguez *et al.*, 2023). Estos ecosistemas son característicos del estado de Oaxaca, sin embargo, son los más afectados por el cambio de uso de suelo; la tasa de deforestación anual es de 17,796 ha año⁻¹ para la conversión en áreas agrícolas, pecuarias, y además para la expansión de asentamientos humanos (Monroy *et al.*, 2015; CONAFOR, 2021; García *et al.*, 2021).

El cambio de uso de suelo de la vegetación natural de bosques y selvas causan pérdida de la diversidad biológica y hábitat, altera el microclima del sitio, se libera CO₂ por la aceleración de la tasa de descomposición y combustión de la materia orgánica, disminuye la infiltración del agua, aumenta la erosión, entre otros (Sahagún-Sánchez y Reyes-Hernández, 2018). Se propicia procesos de deforestación, fragmentación y degradación de estos ecosistemas. Estas perturbaciones provocan la fragmentación de la vegetación primaria en manchones pequeños y como resultado, la creación de áreas con vegetación secundaria (Ortega-Baranda *et al.*, 2020).

Para analizar los cambios en la cobertura de la vegetación de un área bajo estudio, frecuentemente se usa información procesada a partir de imágenes de satélite (Seifu *et al.*, 2023), las que se obtienen en plataformas de código abierto, se preprocesan realizando correcciones geométricas, después se generan los ortomosaicos con software de sistemas de información geográfica, mediante algoritmos se realiza la clasificación supervisada y la conversión de archivos de formato raster a vectorial (Hernández-Cavazos *et al.*, 2023).

En México se han realizado investigaciones sobre cambios en la cobertura y uso del suelo, por ejemplo, Escobar y Castillo (2021) identificaron tendencias y patrones espaciales del cambio de uso del suelo en un periodo de 25 años en la región del Soconusco, Chiapas y encontraron que esa región está inmersa en una intensificación agrícola y de urbanización, la tendencia es hacia la pérdida de la vegetación natural en donde se incluyen manglares y sistemas agroforestales. Salinas-Castillo *et al.* (2020) analizaron el cambio de uso de la tierra en Tamaulipas, México, durante un periodo de 30 años, mediante el procesamiento de imágenes tipo Landsat de acceso gratuito, con software de sistemas de información geográfica, obtuvieron que la frontera agrícola creció un 7.61 % y la cobertura vegetal se redujo 6.5 %. En Oaxaca, Sandoval-García *et al.* (2021) evaluaron el

cambio de uso de suelo y vegetación en una microcuenca de la Mixteca Alta durante un periodo de 1995 a 2016, mediante imágenes de alta resolución y clasificación supervisada, estimaron un incremento positivo de 6.6 % de la cobertura forestal, a partir de estrategias de restauración realizadas por las comunidades indígenas e instituciones gubernamentales.

La región Istmo de Tehuantepec del estado de Oaxaca, se caracteriza por poseer variación en los tipos de ecosistemas, que van desde los tropicales como la selva baja caducifolia, hasta los templados de tipo pino encino en pequeñas porciones de las partes altas de la cuenca (Pérez-García *et al.*, 2001; Flores, 2023), mismos que se pueden encontrar en la localidad de Magdalena Tequisistlán. En esos ecosistemas de este municipio se practica agricultura de temporal, principalmente por roza-tumba y quema. Palomeque *et al.* (2021) comentan que la actividad agrícola de una zona bajo estudio puede variar en el espacio y tiempo, el aumento de ella altera la composición, diversidad y establecimiento de las especies vegetales de los ecosistemas (Ferrufino-Acosta *et al.*, 2019); la disminución de ésta por abandono de tierras, puede propiciar el desarrollo de vegetación secundaria (Valencia *et al.*, 2022).

El aumento o disminución de la actividad agrícola es un fenómeno complejo que debe analizarse a diferentes escalas temporales, puesto que las causas pueden ser socioeconómicas, ambientales y de gestión (Lasanta *et al.*, 2021; González *et al.*, 2024). Analizar la dinámica del cambio de uso del suelo en el espacio y tiempo en áreas con vegetación natural, permite predecir las tendencias en el establecimiento o eliminación de algún tipo de uso de suelo o vegetación y las consecuencias derivadas de éstas (Maza-Villalobos *et al.*, 2023). También se convierte en una herramienta de gestión para la toma de decisiones sobre el ordenamiento, manejo, conservación y restauración de los recursos (Escandón *et al.*, 2018; Paula *et al.*, 2018).

En la región del Istmo de Tehuantepec las investigaciones sobre este tópico son singulares, por lo que el objetivo de la investigación fue realizar un análisis multitemporal de la microcuenca Magdalena Tequisistlán, Tehuantepec, Oaxaca, para estimar los cambios de cobertura de uso del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La microcuenca de Magdalena Tequisistlán, pertenece a la región hidrológica número 22 de Tehuantepec, a la subcuenca Benito Juárez, y a la microcuenca 027 perteneciente al municipio de Magdalena Tequisistlán,

Tehuantepec, Oaxaca. Se ubica en el suroeste del estado de Oaxaca, coordenadas geográficas $16^{\circ} 22' 19.9''$ N y $95^{\circ} 33' 37.84''$ O, tiene una superficie total de 7,128.05 ha, de las cuales 294.13 ha corresponde a asentamientos humanos (Figura 1). El clima que predomina es de tipo BS_1 (h) w (semi seco muy cálido), con temperatura media anual de 28°C , los tipos de suelos son: regosol, cambisol y litosol (INEGI, 2022).

Adquisición de imágenes

Las ortofotos se obtuvieron de la plataforma Espacios y Datos de México (<https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/ortoimagenes/#Descargas>) y las imágenes satelitales de alta resolución Airbus Defence and Space, GeoEye-1 y Birdseye del software SASPlanet (<http://www.sasgis.org/download/>), ambas herramientas son de código abierto y permite realizar

la visualización y descarga de las imágenes de manera gratuita. Se generaron cuatro ortomosaicos compuestos por cuatro ortofotos de 1.5 m/píxel (año 1995), 38 imágenes de Airbus Defence and Space de 0.57 m/píxel (año 2008), 80 imágenes de GeoEye-1 de 0.28 m/píxel (año 2014) y 80 imágenes Birdseye 0.28 m/píxel (año 2023) (Figura 2).

Pre-procesamiento de imágenes y clasificación digital

Para preparar las imágenes satelitales previo a su procesamiento y utilización en el análisis, se realizó una corrección geométrica a través de la toma de puntos de control identificables en cada una de las imágenes a trabajar, que consistieron en sitios distribuidos de forma sistemática en áreas con alto grado de confusión por la reflectancia de las imágenes, la exposición, el ruido y la nubosidad.

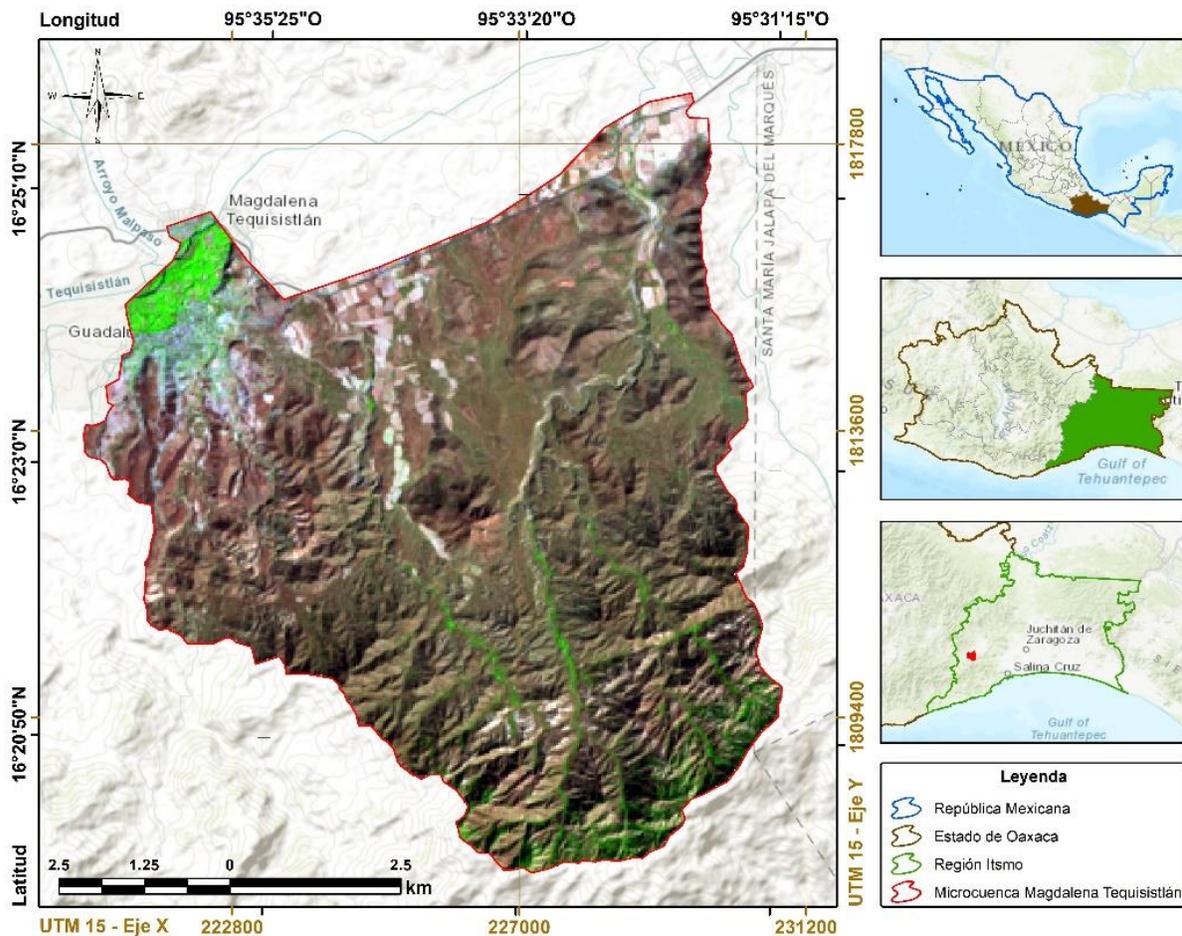


Figura 1. Localización de la microcuenca de Magdalena Tequisistlán, Oaxaca, México.

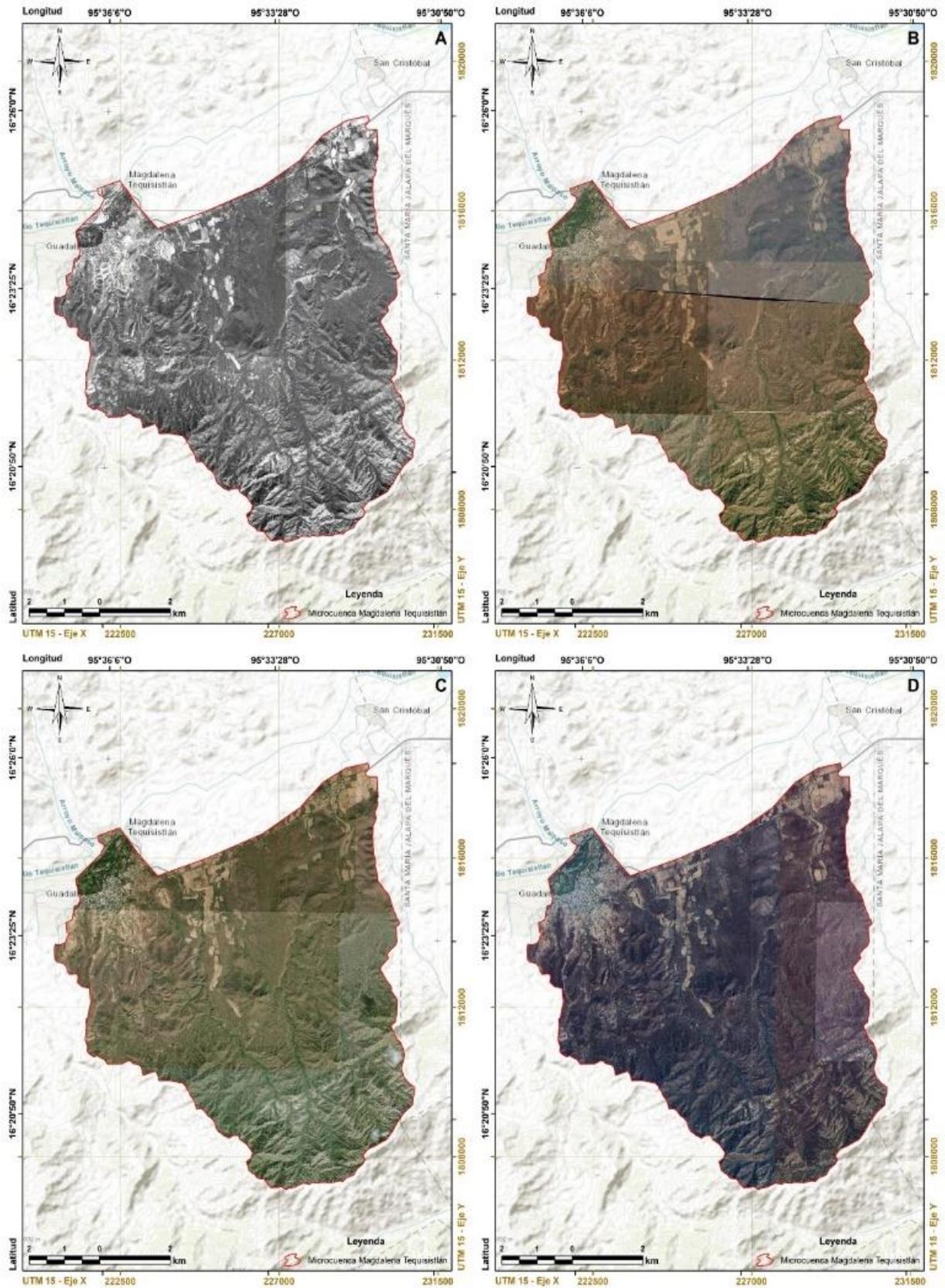


Figura 2. Imágenes Landsat de la microcuenca Magdalena Tequisistlán, Tehuantepec, Oaxaca, México, para el año 1995 (A), 2008 (B), 2014 (C), 2023 (D).

Para la clasificación de las imágenes, se utilizó el método de clasificación supervisada a partir de la generación de ortomosaicos. Para la detección de cambios se utilizó el software Quantum GIS QGIS 3.36.0 “Maidenhead”[®] de código abierto (QGIS Development Team, 2024).

La corrección atmosférica a las imágenes de cada periodo de tiempo se realizó recortando y sometiendo la imagen al algoritmo de clasificación no supervisada K-Means, que agrupa los valores de celda en clases con el método de análisis de conglomerados de datos multivariados; posteriormente se realizó la conversión de los archivos de formato ráster a vectorial, para una clasificación supervisada (Sandoval-García *et al.*, 2021).

Se generó información relacionada con los distintos usos de suelo, cobertura vegetal y tipo de vegetación, la cual se comparó con la desarrollada por INEGI (2022), obteniendo una clasificación de diferentes usos de suelo: bosque de pino-encino, selva baja caducifolia, vegetación secundaria, agricultura, caminos y asentamientos humanos, distribuidas en la microcuenca Magdalena Tequisistlán.

Validación de información

Para el cálculo de la concordancia y precisión de los resultados de clasificación de las imágenes satelitales de alta resolución se utilizó el módulo *r.kappa* en GRASS 7.6.0 (QGIS Development Team, 2024), en el cual se generó una matriz de error y se determinó el índice de Kappa (0.84), mediante la siguiente ecuación (Quezada *et al.*, 2022):

$$K = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e}$$

Donde:

K = Índice de Kappa

P_o = Concordancia observada.

P_e = Concordancia esperada por azar.

1 - P_e = Máxima concordancia potencial no correspondida a la casualidad.

Los criterios utilizados para la interpretación del coeficiente de Kappa son los propuestos por Landis y Koch (1977).

Análisis multitemporal y tasa de cambio de cobertura anual

Para calcular los cambios (aumento o pérdida) de cobertura vegetal y de uso de suelo, se generó una tabulación cruzada entre cuatro periodos de tiempo diferentes: 1995-2008, 2008-2014, 2014-2023 y 1995-2023. Se calcularon los cambios porcentuales, el

cambio neto, la tasa de cambio y el cambio relativo para cada tipo de cobertura vegetal a lo largo del tiempo.

Los cambios en la cobertura del suelo se identificaron mediante la comparación del conjunto de dos mapas de cobertura vegetal y de uso de suelo y creando nuevos mapas que indicaron la transición existente entre los años de estudio. Con los datos obtenidos en el procesamiento de las imágenes se calculó la tasa de deforestación anual, la cual consiste en comparar la cobertura del suelo de un mismo sitio en dos periodos de tiempo diferentes, para lo cual se utilizó la ecuación propuesta por Puyravaud (2003):

$$r = \left(\frac{1}{t_2 - t_1} \right) \times \ln \left(\frac{A_2}{A_1} \right) \times 100$$

Donde:

r = Tasa de cambio de cobertura

A₁ = Cobertura vegetal o uso de suelo en el tiempo inicial

A₂ = Cobertura vegetal o uso de suelo en el tiempo final

t₁ = Período inicial

t₂ = Período final

Un valor “r” positivo indica aumento de la cobertura vegetal, mientras que un valor negativo demuestra una pérdida de cobertura.

A los datos de tasa de cambio de cobertura, se les aplicó la prueba de rangos con signo de Wilcoxon para determinar diferencias estadísticas en los diferentes periodos evaluados, con el procedimiento *UNIVARIATE* de SAS (SAS Institute Inc., 2004).

RESULTADOS

Cambios en la cobertura del suelo

Se determinó un índice de Kappa de 0.84 derivado del análisis de las imágenes clasificadas tipo Landsat durante el periodo (1995-2023), donde los tipos de vegetación identificados en la microcuenca de Magdalena Tequisistlán fueron selva baja caducifolia, que sus especies representativas son *Lysiloma microphyllum* Benth., *Amphipterygium adstringens* (Schltdl.) Schiede ex Standl., *Ceiba aesculifolia* (Kunth) Britten & Baker f., *Bursera excelsa* (Kunth) Engl., *Genipa americana* L., vegetación secundaria de selva baja caducifolia con los taxas, *Vachellia farnesiana* (L.) Wight & Arn., *Opuntia tehuantepecana* (Bravo) Bravo, *Euphorbia schlehtendalii* Boiss. y *Jatropha standleyi* Steyer., bosque de pino-encino caracterizado con *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl. y *Quercus peduncularis*

Née, vegetación secundaria de bosque de pino-encino, *Byrsonima crassifolia* (L.) Kunth y *Dodonaea viscosa* (L.) Jacq.; así como superficies destinadas a la agricultura (Figura 3).

En el año 1995 el 47.6 % (3 256.57 ha) de la superficie total (6,833.92 ha) correspondía a vegetación secundaria de selva baja caducifolia, en tanto, 4.7 % (325.52 ha) fue para el tipo de vegetación bosque de pino-encino. Sin embargo, la selva baja caducifolia en el año 1995 pasó del 22.9 % (1565.26 ha) a 13.3 % (911.7 ha) para el año 2023. En este análisis de 28 años, la agricultura decreció 3.7 % y se reflejó en el aumento de la vegetación secundaria de la selva baja caducifolia que pasó de 47.6 % a 60.1 % (4103.79 ha) (Tabla 1).

El análisis multitemporal evidenció que durante los periodos evaluados los cambios netos en los tipos de cobertura fueron dinámicos. Por ejemplo, en la selva baja caducifolia entre 1995 y 2023 se obtuvo una pérdida de 653.53 ha, al igual que la agricultura disminuyó su superficie en 256.35 ha; mientras que la vegetación secundaria de la selva baja caducifolia y vegetación secundaria del bosque de pino encino aumentaron su superficie (847.22 y 94.33 ha, respectivamente). No obstante, el cambio de cobertura en los diferentes tipos de vegetación, en los periodos evaluados de la microcuenca de Magdalena Tequisistlán, no evidenció diferencias estadísticas significativas de acuerdo con la prueba de rangos con signo de Wilcoxon: estadístico $S = -0.5$ y $Pr \geq |S| 1.000$ (Tabla 2).

Cambio relativo del uso del suelo

La agricultura mostró una tasa de cambio relativo en terrenos cuya vegetación original era de selva baja caducifolia y bosque de pino-encino (-1.57 y -0.88 %, respectivamente) durante el periodo 1995-2023, lo que indica que esta actividad disminuyó en la microcuenca de Magdalena Tequisistlán. Sin embargo, este decremento provocó que en esas áreas se presentara aumento de la vegetación secundaria para cada tipo de vegetación evaluada (0.82 y 0.49, respectivamente) (Figura 4).

DISCUSIÓN

El índice Kappa se utiliza para la validación y clasificación de imágenes satelitales de alta resolución, utiliza valores que van desde <0.00 a 1.0, para la

interpretación de los coeficientes Landis y Koch (1977) proponen que los valores cercanos a cero no tienen fuerza de acuerdo y cercanos a 1 sugieren un acuerdo perfecto entre la precisión del mapa y la realidad observada. En este sentido, el valor calculado en este estudio fue de 0.84, que de acuerdo con el índice anterior lo clasifica con un acuerdo muy confiable. Este resultado coincide con Sepúlveda-Varas *et al.* (2019) al realizar análisis de cambio de cobertura y uso del suelo en una subcuenca preandina chilena, estos autores argumentan que sus resultados sugieren precisión en la cartografía. Estos valores de índice de Kappa son cercanos al obtenido por Cobos *et al.* (2021) al realizar un análisis multitemporal de cambios de cobertura y uso del suelo en una cuenca del río Jubones en Ecuador, obtuvieron una precisión de 0.90.

Las investigaciones recientes sobre los cambios de cobertura en el uso del suelo concluyen que la tendencia en el uso de la tierra para actividades agropecuarias y urbanas va en aumento, que son la principal causa de la deforestación de los ecosistemas naturales (García-Gil *et al.*, 2020; Quezada *et al.*, 2022; Paredes-Arcos *et al.*, 2024). Sin embargo, en el presente estudio realizado en la microcuenca de Magdalena Tequisistlán, el cambio de cobertura de áreas con agricultura en el tipo de vegetación selva baja caducifolia y bosque de pino-encino fue (-1.57 y -0.88 %, respectivamente); indica que esta actividad disminuyó y se vio reflejado con el aumento de vegetación secundaria.

El cambio de cobertura del uso de suelo obtenido en la presente investigación, son cercanos a los reportados por Santibáñez-Andrade *et al.* (2023) en su análisis multitemporal de la degradación de los bosques de encino y oyamel en la cuenca de México (1993-2014), mostraron una tasa anual de cambio negativo para el bosque de encino (-0.89 %), además determinaron que la cubierta vegetal de los bosques primarios se ha ido degradando con el tiempo, sin embargo, se muestra la recuperación debido a la vegetación secundaria. En este sentido, los resultados obtenidos en la investigación son inferiores al reportado por García *et al.* (2023), en su estudio sobre la dinámica de la frontera agrícola en un sistema de cuencas hidrográficas del zapotal, Ecuador, durante los últimos 30 años; obtuvieron y procesaron imágenes satelitales de alta calidad y resolución mediante herramientas de teledetección, y evidenciaron una disminución de aproximadamente 15 %.

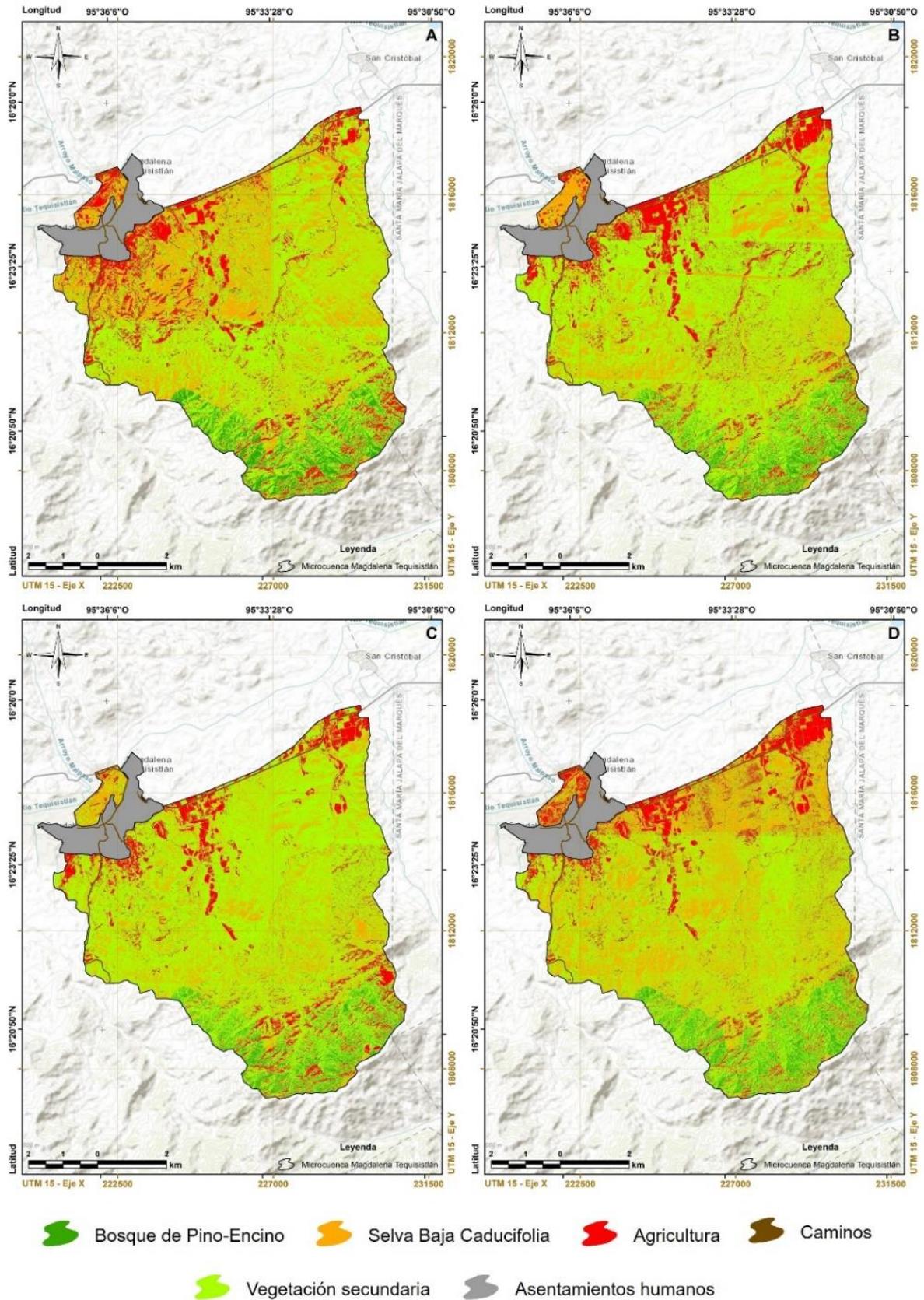


Figura 3. Mapas de cobertura terrestre en la microcuenca de Magdalena Tequisistlán, Tehuantepec, Oaxaca, México.

Tabla 1. Cobertura total por tipo de vegetación entre los años 1995 y 2023 de la microcuenca Magdalena Tequisistlán, Oaxaca.

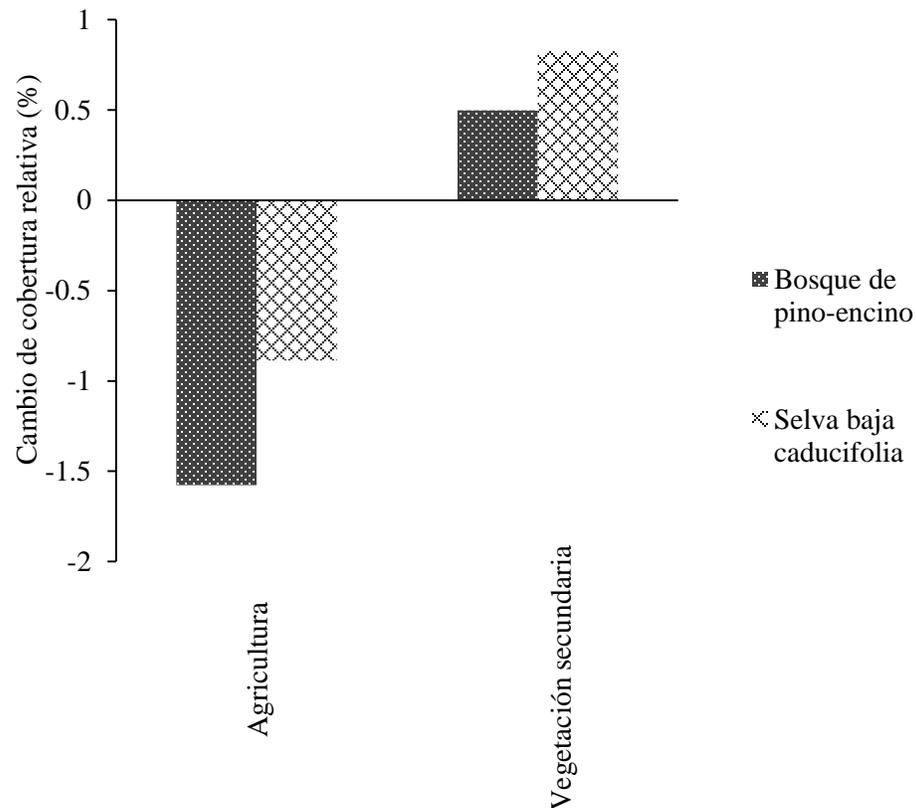
Tipo de vegetación	1995		2008		2014		2023	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
Bosque de pino-encino	325.52	4.7	253.7	3.7	279.46	4.1	293.7	4.3
Vegetación secundaria de BPE	629.89	9.21	704.23	10.3	720.59	10.5	724.22	10.59
Selva baja caducifolia	1565.26	22.9	1246.8	18.2	951.2	13.9	911.7	13.3
Vegetación secundaria de SBC	3256.57	47.6	3583.3	52.4	3885.23	56.8	4103.79	60.1
Agricultura	1056.68	15.4	1045.80	15.3	997.45	14.6	800.32	11.7

BPE = bosque de pino-encino; SBC = selva baja caducifolia.

Tabla 2. Cambio neto de los tipos de cobertura de la vegetación en los años 1995, 2008, 2014, 2023, de la microcuenca Magdalena Tequisistlán, Oaxaca.

Tipo de vegetación	Cambio neto de cobertura (ha)			
	1995-2008	2008-2014	2014-2023	1995-2023
Bosque de pino-encino	-71.82	25.76	14.24	-31.82
Vegetación secundaria de BPE	74.34	16.36	3.63	94.33
Selva baja caducifolia	-318.46	-295.6	-39.5	-653.53
Vegetación secundaria de SBC	326.72	301.94	218.56	847.22
Agricultura	-10.88	-48.35	-197.13	-256.35

BPE = bosque de pino-encino; SBC = selva baja caducifolia. Los valores con signo negativo representan pérdida o disminución en la cobertura.

**Figura 4.** Tasa de cambio en la cobertura del bosque de pino-encino y selva baja caducifolia, durante el periodo de 1995-2023, en la microcuenca de Magdalena Tequisistlán, Oaxaca, México.

Lasanta *et al.* (2021) refieren que las causas principales que dirigen al abandono de tierras o disminución en la actividad agrícola son las siguientes: la migración de la población rural hacia las ciudades y el envejecimiento de los propietarios, las innovaciones tecnológicas, la baja productividad de los campos, y también en la dinámica de factores como la fertilidad en el suelo, aumento de la temperatura, precipitaciones irregulares; estos últimos intervienen en la productividad de los cultivos y por ende la rentabilidad y competitividad del producto o cosecha.

En este estudio, la disminución de las zonas con agricultura puede atribuirse en que en el periodo del 2010 a 2020, la población de Magdalena Tequisistlán, decreció 3 % de su población total, pasó de 6,182 a 5 996 habitantes, mientras que el grupo de edad de 60 años y más aumentó de 3.2 a 13 %. (INEGI, 2010, 2020). En adición a lo anterior, se observó que en la microcuenca bajo estudio muestra una tendencia de aumento de la temperatura media anual a partir del 2010, además de que la precipitación media anual en la zona de estudio es irregular e influye en la productividad de los cultivos de agricultura de temporal que emplean los habitantes en esa microcuenca (Figura 5 y 6).

La recuperación de la cobertura vegetal en los últimos cinco años en zonas que se usaban para agricultura, en

la cobertura identificada como selva baja caducifolia y bosque de pino-encino es resultado del programa gubernamental Sembrando Vida. Los comuneros de Magdalena Tequisistlán han reforestado sus parcelas con especies como *Swietenia macrophylla* King, *Cedrela odorata* L., *Azadirachta indica* A. Juss., *Agave* sp., *Bursera graveolens* (Kunth) Triana & Planch., *Spondias* sp., *Mangifera indica* L., *Citrus* sp., *Moringa oleifera* Lam., entre otros (Figura 7). Estos resultados son similares a Sandoval-García *et al.* (2021), puesto que realizaron un análisis multitemporal del cambio en la cobertura del suelo en la Mixteca Alta Oaxaqueña, encontraron un incremento positivo en la cobertura forestal de 6.6 % durante el periodo de 1995 al 2016. Discuten que, a partir de las estrategias de restauración impulsadas por las comunidades indígenas e instituciones gubernamentales, la agricultura tuvo una disminución de 8.4 %. También refieren que muchas áreas han sido abandonadas debido a la pérdida productividad del suelo, y la alteración del régimen de precipitación, pero también por la migración de personas que se dedicaba a la agricultura. De igual manera, Sandoval-García y Cantú-Silva (2021) reportaron un cambio positivo de la cobertura del bosque de pino en áreas abandonadas de la subcuenca Río Copalita en Oaxaca, en virtud de reforestaciones en las últimas décadas como implementación de programas de gobierno, asistencia técnica y buen manejo forestal.

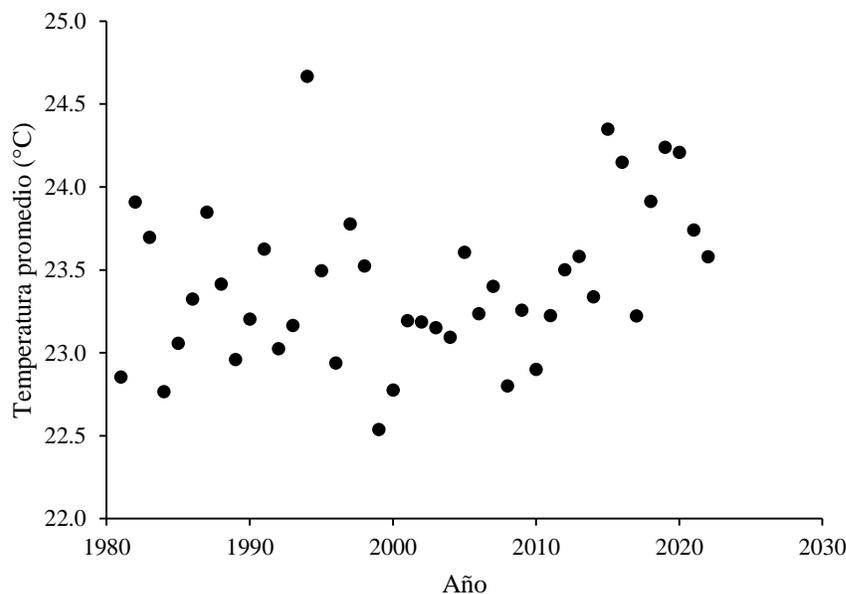


Figura 5. Temperatura media anual en la microcuenca de Magdalena Tequisistlán, Tehuantepec, Oaxaca, México, durante el periodo 1980 a 2023. Elaboración propia a partir de datos de POWER NASA (2024).

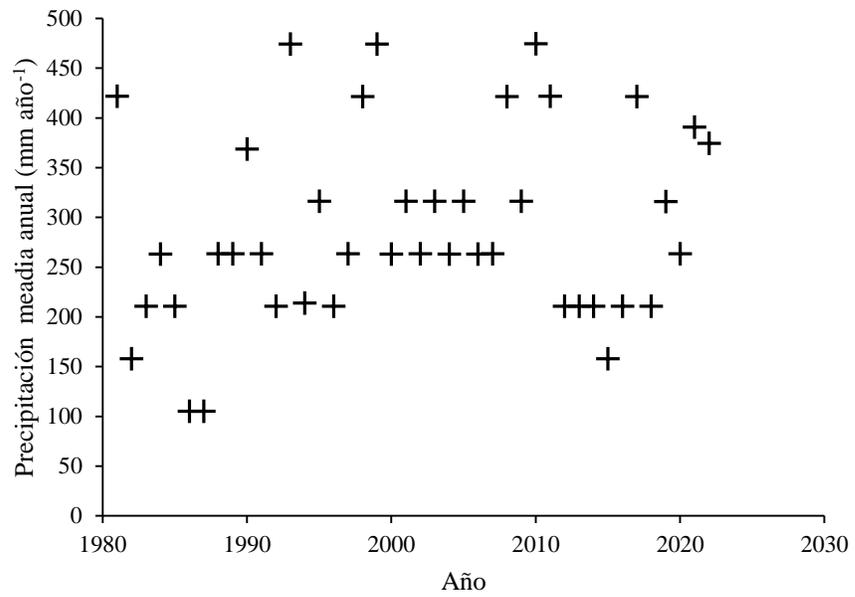


Figura 6. Precipitación promedio anual en la microcuenca Magdalena Tequisistlán, Tehuantepec, Oaxaca, México, durante el periodo de 1980 a 2023. Elaboración propia a partir de datos de POWER NASA (2024).



Figura 7. Escenario actual de las reforestaciones en terrenos con abandono de tierras, en la microcuenca de Magdalena Tequisistlán, Tehuantepec, Oaxaca, México.

La detección de cambios en las coberturas del uso del suelo mediante procesamiento de imágenes satelitales multitemporales, permite contextualizar los procesos de pérdida, degradación y recuperación de la vegetación para tener una visión integral de las causas naturales, sociales y económicas de los cambios en las escalas global, regional y local (Figueredo, 2020; Gallardo *et al.*, 2022). En este sentido, Hernández-Pérez *et al.* (2022) refieren que esa información que se obtiene de los análisis multitemporales puede ayudar a formuladores de políticas locales a establecer mecanismos de causa-efecto e identificar prioridades a largo plazo.

CONCLUSIONES

La microcuenca de Magdalena Tequisistlán, Tehuantepec, Oaxaca presenta cobertura de selva baja caducifolia, vegetación secundaria de selva baja caducifolia, bosque de pino-encino, vegetación secundaria de bosque de pino-encino, así como superficies destinadas a la agricultura. Sin embargo, en el periodo de 1995 a 2023 la superficie dedicada a agricultura decreció 2.45 % que puede atribuirse en el abandono de tierras por el envejecimiento de la población, aumento de la temperatura y precipitaciones irregulares, evidenciando que los programas gubernamentales y asistencia técnica, cuyo objetivo es reforestar, propician la recuperación de zonas con perturbación.

El análisis de dinámicas de cambio de uso del suelo mediante imágenes de alta resolución ayuda a detectar cambios espaciales y temporales, con ello se evalúa la tasa de cambio del medio natural y las repercusiones que tienen las actividades antrópicas en el ecosistema. El análisis de factores que influyen en la dinámica del cambio de uso del suelo como la edad de los habitantes de la población, las variaciones en el patrón de lluvias y temperatura, así como políticas gubernamentales dedicadas a reforestación permitieron determinar el estado actual de la microcuenca de Magdalena Tequisistlán, en el contexto social, ambiental y espacial.

Agradecimientos

El primer autor agradece al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca otorgada para estudios de posgrado y al Programa de Doctorado en Ciencias en Productividad en Agroecosistemas en el Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca.

Funding. None.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Compliance with ethical standards. The authors declare that they have complied with national and international standards or research, data collection and analysis and the research present original data that has not been sent to another journal.

Data availability. The data is available through the corresponding author: rufino.sandoval.garcia@gmail.com, reasonable request.

Author contribution statement (CRediT). **J.A. García-Aguilar:** Conceptualization, investigation, writing – original draft. **R. Sandoval-García:** Formal analysis, investigation, supervision, writing-original draft, data curation. **J.R. Enríquez-del Valle:** Conceptualization, investigation, methodology, supervision, validation, writing original draft and writing review and editing. **G. Rodríguez-Ortiz:** Formal análisis, investigación, supervisión, writing-original draft. **J. C. Leyva López:** Visualization, writing-original draft, writing-review & editing. **J. Martínez de la Cruz:** Investigation, supervision, writing original draft and writing review and editing.

REFERENCES

- Cobos, A.J.D., Luna, R.A.E., Barrezueta, U.S.A. and Jaramillo, A.E.E., 2021. Análisis multitemporal de cambios de cobertura y uso del suelo: cuenca del río Jubones, Ecuador. *Revista Científica Agroeco-sistemas*, 9(1), pp.114-121. <https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes/article/view/456>
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR)., 2021. Sistema Nacional de Monitoreo Forestal. <https://snmf.cnf.gob.mx/deforestacion/>. Consultado el 20 de febrero de 2024.
- Escandón, C.J., Ordóñez, D.J.A.B., Nieto, P.C. del C. and Ordóñez, D.M.J., 2018. Cambio en la cobertura vegetal y uso del suelo del 2000 al 2009 en Morelos, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(46), pp. 27-51. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i46.135>
- Escobar, F.R.E. and Castillo, S.M.A., 2021. Cambios en la cobertura y uso del suelo en la región del Soconusco, Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(66), pp. 46-69. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i66.755>
- Ferrufino-Acosta, L., Cruz, S.Y., Mejía-Ordóñez, T., Rodríguez, F., Escoto, D., Sarmiento, E. and Larkin, J.L., 2019. Composición, estructura y diversidad florística del bosque seco en el Valle de Agalta, Honduras. *Madera y*

- Bosques*, 25(2), pp. 1-15.
<https://doi.org/10.21829/myb.2019.2521635>
- Figueredo, F., J.L., Ramón, P.A.M. and Barrero, M.H., 2020. Análisis multitemporal del cambio de cobertura vegetal en el área de manejo "Los Números" Guisa, Granma. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 8(1), pp. 1-15.
<https://cfores.upr.edu.cu/index.php/cfores/article/view/438>
- Flores, M.G., 2023. Biodiversidad del istmo de Tehuantepec y políticas internacionales de conservación ambiental. Caso modelo de pago por servicios ambientales. *Utopía y Práxis Latinoamericana*, 28(102), pp. 1-20.
<http://doi.org/10.5281/zenodo.8027778>
- Flores-Morales, E.A., Aguirre-Calderón, O.A., Treviño-Garza, E.J., González-Tagle, M.A., Alanís-Rodríguez, E., Angeles-Pérez, G. and Huizar-Amezcu, F., 2022. Diversidad y estructura arbórea de un bosque templado bajo manejo forestal en el municipio de Pueblo Nuevo, Durango, México. *Polibotánica*, 54, pp. 11-26.
<http://doi.org/10.18387/polibotanica.54.2>
- Gallardo, A.B.G., Morales, H.J.C., Fausto, O.M., Bravo, O.M.L. and Carrillo, G.F.M., 2022. Cambio de cobertura vegetal y uso de suelo generado por actividades agrícolas en el municipio de Bahía de Banderas, Nayarit, México. *Acta Universitaria*, 32, pp. 1-18.
<http://doi.org/10.15174.au.2022.3618>
- García, F.A., Valle, M.R. and Monrroy, M.R., 2021. El patrimonio biocultural de la selva baja caducifolia, Sierra de Huautla, Morelos. *Inventio*, 41, pp. 1-13.
<https://doi.org/10.30973/inventio/2021.17.41/3>
- García, O.Y., Valdez, R., D. and Mancero, C.D., 2023. Dinámica de la frontera agrícola del sistema de cuencas hidrográficas del zapotal mediante herramientas de teledetección. *Revista Ciencia y Tecnología*, 16(1), pp. 12-23.
<https://doi.org/10.18779/cyt.v16i1.637>
- García-Gil, G., Sosa-Escalante, J.E., Aguilar-Cordero, W.J., Flores-Guido, J.S. and Fernández, M.Y., 2020. Cambio de uso del suelo en la zona sujeta a conservación ecológica Reserva Cuxtal, Mérida, Yucatán, México. *Investigaciones Geográficas*, 101, pp. 1-15.
<https://doi.org/10.14350/riig.59895>
- González, S.F., Ullón, D., Yaguachi, A.A. L., Ramos, A., J.A., Montenegro, B.V.E. and Loján, C.J.I., 2024. Análisis multitemporal de cambios de uso del suelo en la isla Santa Cruz, archipiélago de las Galápagos, periodo 1991 - 2023. *Ciencia Y Tecnología*, 17(1), pp. 1-9.
<https://doi.org/10.18779/cyt.v17i1.521>
- Hernández-Cavazos, M.C., Sandoval-García, R., Molina-Guerra, V.M. and Alanís-Rodríguez, E., 2023. Análisis multitemporal del cambio de uso de suelo en el municipio de Linares, Nuevo León. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 10(2), pp. 1-14.
<https://doi.org/10.19136/era.a10n2.3743>
- Hernández-Pérez, E., García-Franco, J.G., Vázquez, G. and Cantellano, R.E., 2022. Cambio de uso de suelo y fragmentación del paisaje en el centro de Veracruz, México (1989-2015). *Madera y Bosques*, 28(1), 1-22.
<https://doi.org/10.21829/myb.2022.2812294>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2010. Censo de población y vivienda 2010. Tabulados del cuestionario ampliado.
<https://www.inegi.org.mx/app/descarga/> Consultado el 15 de abril de 2024.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2020. Censo de población y vivienda 2020. Tabulados del cuestionario ampliado.
<https://www.inegi.org.mx/app/descarga/> Consultado el 16 de abril de 2024.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2022. Ortoimágenes.
<https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/ortoimagenes/#Descargas> Consultado el 12 de febrero de 2024.
- Landis, J.R. and Koch, G.G., 1977. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, 33, pp. 159-174.
- Lasanta, T., Nadal-Romero, E., Khorchani, M. and Romero-Díaz, A., 2021. Una revisión sobre las tierras abandonadas en España: de los paisajes locales a las estrategias globales de gestión. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 47, pp. 447-521.
<http://doi.org/10.18172/cig.4755>
- Maza-Villalobos, S., Alvarado, S.E., Arriaza, R., A.D., Infante, F. and Castillo-Santiago, M.A., 2023. Dinámica del uso de suelo y vegetación en paisajes altamente modificados por actividades agropecuarias en el sur de

- México. *Botanical Sciences*, 101(2), pp. 374-386. <https://doi.org/10.17129/botsci.3148>
- Monroy, G.A.G., Sánchez-Cordero, V., Briones-Salas, M., Lira-Saade, R. and Maass, M.J.M., 2015. Representatividad de los tipos de vegetación en distintas iniciativas de conservación en Oaxaca, México. *BOSQUE*, 36 (2), pp. 199-210. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002015000200006>
- Ortega-Baranda, V., Sánchez-Bernal, E.I., Sánchez-Aragón, L., Luis-Reyna, M.A. and Ruvalcaba-Gómez, G., 2020. Vegetación arbórea de las selvas bajas caducifolias en suelos litosoles y regosoles eutrícos degradados. *Terra Latinoamericana*, 38(2), pp. 377-390. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i2.611>
- Palomeque, C., M.A., Ruiz, A.S.C., Ramos, R.R., Magaña, A.M.A. and Galindo, A.A., 2021. Modelación de cambios de coberturas y uso de suelo en Nacajuca, Tabasco. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(4), pp. 655-669. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i4.2622>
- Paredes-Arcos, F., Tinoco-Jaramillo, L., Congo-Yépez, C. and Vargas-Tierras, Y., 2024. Análisis multitemporal de deforestación y cambio de la cobertura del suelo, en el cantón La Joya de los Sachas, periodo 1990-2018. *Bionatura*, 9(1), pp. 1-13. <http://dx.doi.org/10.21931/RB/2024.09.01.18>
- Paula, P.A., Zambrano, L. and Paula, P., 2018. Análisis Multitemporal de los cambios de la vegetación, en la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo como consecuencia del cambio climático. *Enfoque UTE*, 9(2), pp. 125-137. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v9n2.252>
- Pérez-García, E., Meave, J. and Gallardo, C., 2001. Vegetación y flora de la región de Nizanda, Istmo de Tehuantepec, Oaxaca, México. *Acta Botánica Mexicana*, 56, pp.19-88.
- POWER NASA Project., 2024. The Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER). NASA Applied Sciences Program within the Earth Science Division of the Science Mission Directorate. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> Consultado el 1 de abril de 2024.
- Puyravaud, J.P., 2003. Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management*, 177, pp. 593-596.
- QGIS Development Team., 2024. QGIS Geographic Information System. Open-Source Geospatial Foundation Project. <https://qgis.org> Consultado el 19 de enero de 2024.
- Quezada, A.S., Sevilla, T., J. D. and Avilés, S.E.C., 2022. Estimación de la tasa de deforestación en Pastaza y Orellana- Ecuador mediante el análisis multitemporal de imágenes satelitales durante el período 2000-2020. *Revista Alfa*, 6(17), pp. 282-299. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v6i17.168>
- Rodriguez, P.A., Palacios, F.M.I., Mohedano, C.L. and Villanueva, M.A., 2023. Estructura y diversidad arbórea de un bosque de pino-encino en Huiztlatzala, Guerrero, México. *Polibotánica*, 55, pp. 25-40. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.55.3>
- Sahagún-Sánchez, F.J. and Reyes-Hernández, H., 2018. Impactos por cambio de uso de suelo en las áreas naturales protegidas de la región central de la Sierra Madre Oriental, México. *CienciaUAT*, 12(2), pp. 6-21. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v12i2.831>
- Salinas-Castillo, W.E., Terrazas-Ruiz, M., Mora-Olivo, A. and Paredes-Hernandez, C.U., 2020. Análisis multitemporal de cambios de uso de la tierra en San Fernando, Tamaulipas, durante el periodo 1987 a 2017. *Ciencia UAT*, 14(2), pp.160-173. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v14i2.1298>
- Sandoval-García, C. and Cantú-Silva, I., 2021. Análisis geomático del cambio de uso del suelo en la subcuenca río Copalita, Oaxaca. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 2, pp. 1-12. <http://doi.org/10.19136/era.a8nII.2915>
- Sandoval-García, R., González-Cubas, R. and Jiménez-Pérez, J., 2021. Análisis multitemporal del cambio en la cobertura del suelo en la Mixteca Alta Oaxaqueña. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(66), pp. 96-121. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i66.816>
- Santibáñez-Andrade, G., Valdez-Lazalde, J.R. and Guerra-Martínez, F., 2023. Análisis multitemporal de la degradación de los

- bosques de encino y oyamel en la Cuenca de México (1993-2014). *Madera y Bosques*, 29 (1), pp.1-18. <https://doi.org/10.21829/myb.2023.2912323>
- SAS Institute Inc., 2004. SAS/STAT 9.1 User's guide. Cary: SAS Institute
- SASPlanet., 2022. SASPlanet Software. Version 181221. SASPlanet Development Team. <https://www.sasgis.org>. Consultado el 02 de febrero de 2024.
- Seifu, T.K., Woldesenbet, T.A., Alemayehu, T. and Ayenew, T., 2023. Spatio-Temporal Change of Land Use/Land Cover and Vegetation Using Multi-MODIS Satellite Data, Western Ethiopia. *Scientific World Journal*, 2023, pp. 1-17. <https://doi.org/10.1155/2023/7454137>
- Sepúlveda-Varas, A., Saavedra-Briones, P. and Esse, C., 2019. Análisis de cambio de cobertura y uso de suelo en una subcuenca preandina chilena. Herramienta para la sustentabilidad productiva de un territorio. *Revista de Geografía Norte Grande*, 72, pp. 9-25. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022019000100009>
- Silva-Aparicio, M., Castro-Ramírez, A.E., Castillo-Campos, G. and Perales, R.H., 2018. Estructura de la vegetación leñosa en tres áreas con Selva Baja Caducifolia en el Istmo-Costa de Oaxaca, México. *Revista de Biología Tropical*, 66(2), pp. 863-879. <http://doi.org/10.15517/rbt.v66i2.33419>
- Valencia, N.M., Castillo, S.M.A., Bello, B.E. and Vásquez, S.M.A., 2022. Regeneración y conservación del bosque comunitario, el caso de Chichila, Guerrero. *Madera y Bosques*, 28(3), pp. 1-18. <https://doi.org/10.21829/myb.2022.2832297>