

## Dinámica Espacio-Temporal de los Cambios de Uso y Cobertura del Suelo en la Microcuenca Hueyateno Spatiotemporal Dynamics of Land Use and Cover Changes in the Hueyateno Micro-Watershed

Carlos Felipe Luna-Bautista<sup>1</sup> , José Víctor Tamariz-Flores<sup>2</sup>  y  
Rosalía del Carmen Castelán-Vega<sup>2†</sup> 

<sup>1</sup> Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Posgrado en Ciencias Ambientales; (C.F.L.B.) <sup>2</sup> Centro de Investigación en Ciencias Agrícolas; (J.V.T.F.), (R.C.C.V.), Boulevard Valsequillo y Av. San Claudio, Colonia San Manuel. 72570 Puebla, Puebla, México.

† Autora para correspondencia: rosalia.castelan@correo.buap.mx

### RESUMEN

La microcuenca Hueyateno se ubica en la parte alta de la Sierra Norte de Puebla y abarca 8347 ha. Entre 1993 y 2023 ha experimentado transformaciones notables en el uso y cobertura del suelo, reflejando los efectos del crecimiento urbano y agrícola en detrimento de los ecosistemas naturales. Estos cambios provocaron la reducción de la cobertura boscosa, afectando la regulación hídrica y la estabilidad del suelo, lo que representa un desafío para la sostenibilidad ambiental. El objetivo de este estudio fue analizar los cambios espaciales y temporales con el fin de identificar patrones de transformación y sus implicaciones. Para ello, se emplearon imágenes satelitales Landsat correspondientes a 1993, 2014 y 2023, procesadas mediante clasificación supervisada en un software de sistemas de información geográfica, calculando tasas de cambio y matrices de transición. Los resultados muestran una pérdida de 2590.80 ha de bosque entre 1993 y 2023, transformadas principalmente en áreas agrícolas (1914.43 ha) y urbanas (656.10 ha). El crecimiento urbano se concentró primero en la zona norte, extendiéndose hacia áreas medias y sur, favorecido por topografías más planas. Las tasas de cambio evidenciaron un crecimiento urbano sostenido, mientras que la agricultura mostró una expansión intensa durante los 30 años. La falta de planificación territorial favoreció la fragmentación del paisaje y la pérdida de servicios ecosistémicos. Por lo tanto, los resultados subrayan la necesidad de políticas de manejo territorial integrales que equilibren desarrollo socioeconómico y conservación ambiental. Asimismo, la integración del análisis espacial y temporal del cambio de uso del suelo aporta información útil para diseñar estrategias sostenibles en microcuencas similares, destacando la importancia de este estudio para la toma de decisiones.



#### Cita recomendada:

Luna-Bautista, C. F., Tamariz-Flores, J. V., & Castelán-Vega, R. (2025). Dinámica Espacio-Temporal de los Cambios de Uso y Cobertura del Suelo en la Microcuenca Hueyateno. *Terra Latinoamericana*, 43, 1-16. e2204. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.2204>

Recibido: 8 de enero de 2025.  
Aceptado: 22 de abril de 2025.  
Artículo. Volumen 43.  
Septiembre de 2025.

Editor de Sección:  
Dr. Fernando Ayala Niño

Editor Técnico:  
Dr. Fernando López Valdez

**Palabras clave:** *clasificación supervisada, deforestación, servicios ecosistémicos, Sierra Norte de Puebla.*

### SUMMARY

The Hueyateno micro-watershed is located in the upper part of the Sierra Norte de Puebla and covers 8347 ha. Between 1993 and 2023, it experienced significant land use and cover transformations, reflecting the effects of urban and agricultural expansion to the detriment of natural ecosystems. These changes caused forest cover loss, affecting water regulation and soil stability, which represents a challenge for environmental sustainability. The aim of this study was to analyze spatial and temporal changes to identify transformation patterns and their implications. Landsat satellite images from 1993, 2014, and 2023 were used, processed through supervised



**Copyright:** © 2025 by the authors.  
Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

classification in geographic information system software, calculating change rates and transition matrices. Results show a forest loss of 2590.80 ha between 1993 and 2023, mainly converted into agricultural areas (1914.43 ha) and urban zones (656.10 ha). Urban growth was initially concentrated in the northern area, progressively extending to the central and southern zones, favored by flatter topographic conditions. Change rates revealed sustained urban expansion, while agricultural land experienced intense growth over 30 years. Territorial planning limitations contributed to landscape fragmentation and the loss of ecosystem services. Therefore, the findings highlight the need for comprehensive land management policies that balance socioeconomic development with environmental conservation. Moreover, integrating spatial and temporal analysis of land use change provides relevant information for designing sustainable strategies in similar micro-watersheds, underlining the importance of this study for informed decision-making.

**Index words:** supervised classification, deforestation, ecosystem services, Northern Sierra of Puebla.

## INTRODUCCIÓN

La planificación a nivel de cuenca se enfoca en cuestiones de uso del suelo y su impacto en aspectos como la calidad de los arroyos y la diversidad biológica, ya que las cuencas se utilizan como unidades para la gestión del suelo (Lim y Sasaki, 2016). El cambio de cubierta y uso de suelo (CCUS) representa un reto global, ya que la transformación de áreas naturales en ecosistemas dominados por humanos impacta elementos importantes como la vegetación, el agua y la biodiversidad (Astou-Sambou *et al.*, 2023). En este sentido, la microcuenca Hueyateno ha experimentado modificaciones en el uso del suelo, las cuales pueden incidir en la dinámica de sus ecosistemas y en la disponibilidad de sus recursos.

La transformación de la tierra por los seres humanos ha sido constante durante milenios, pero actualmente las transformaciones son más rápidas y generan cambios a escalas locales, regionales y globales en los ecosistemas y procesos ambientales (Banti, Kiachidis y Gemtzi, 2019; Hassan *et al.*, 2016; Sotelo-Caro, Chichia, Sorani y Flores, 2015). Por esa razón, los análisis de los cambios en el uso y la cobertura del suelo son cruciales para monitorear y promover una gestión sostenible de los recursos naturales ante las crecientes demandas y necesidades humanas (Arias-Muñoz, Escolano y Saz, 2024).

En México, múltiples estudios a nivel de cuenca han analizado los patrones de cambio de uso y cobertura de suelo, evidenciando una disminución constante de las áreas boscosas y el crecimiento de áreas agrícolas y urbanas (Gordillo-Ruiz y Castillo, 2016; Hinojosa-Pérez *et al.*, 2024; Pérez-Miranda, Cruz, Moreno, González y Romero, 2012). El uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y técnicas de percepción remota ha demostrado ser fundamental en el monitoreo y análisis del cambio de uso de suelo (Arias-Muñoz *et al.*, 2024), lo que facilita una evaluación detallada y sistemática de las dinámicas espacio-temporales asociadas a los cambios en los tipos de cobertura de suelo, tanto a escala local como regional (Leija, Pavón, Sánchez, Rodríguez y Ángeles, 2021). Estos métodos permiten la detección de tendencias a lo largo del tiempo, proporcionando información clave para la planificación y conservación de los recursos en distintas regiones del país.

A través del análisis geoespacial, mediante el enfoque en microcuencas como áreas de acción ha demostrado ser eficaz para planificar estrategias de recuperación, conservación de recursos naturales y su aprovechamiento social adecuado (Jaramillo-Monroy, Wehncke, Flores, Pohle y López, 2021), por lo que se facilita la detección de las principales tendencias de CCUS.

La Sierra Norte del estado de Puebla ha experimentado transformaciones notables en el uso del suelo en las últimas décadas. Estas modificaciones se atribuyen principalmente al incremento de infraestructura y actividades humanas que han alterado la cobertura vegetal original. Entre 1980 y 2016, la región registró una disminución del 21% en su cubierta vegetal natural, especialmente debido a la reducción de áreas forestales, convertidas en zonas agrícolas o vegetación perturbada (Romero-Rodríguez, Aguilar, Santoyo y Diakite, 2022). Por lo cual, el estudio del cambio de uso y cobertura del suelo (CCUS) en la microcuenca Hueyateno es fundamental para comprender las dinámicas ambientales locales y su relación con procesos regionales más amplios. Esta microcuenca, forma parte de un ecosistema estratégico que abastece de recursos hídricos y mantiene la estabilidad ecológica de la región. Además, debido a la escasez de investigaciones a nivel de microcuenca en la zona norte del Estado de Puebla, se plantea evaluar los cambios en el uso y cobertura del suelo en la microcuenca Hueyateno para los años 1993, 2014 y 2023, con el fin de identificar patrones de transformación y sus posibles implicaciones ambientales proporcionando información valiosa para la gestión sostenible del territorio para contribuir a la conservación de los recursos naturales.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de Estudio

La microcuenca Hueyateno se ubica en el Sierra Norte del Estado de Puebla (Figura 1), forma parte de la cuenca hidrográfica denominada "Tecolutla" (INEGI, 2010). Tiene una superficie de 8347 hectáreas que se extiende total o parcialmente dentro de los municipios de Zacapoaxtla, Zaragoza y Tlatlauquitepec. Además, presenta un relieve accidentado, con altitudes que varían desde los 1153 hasta los 2760 m de altitud.

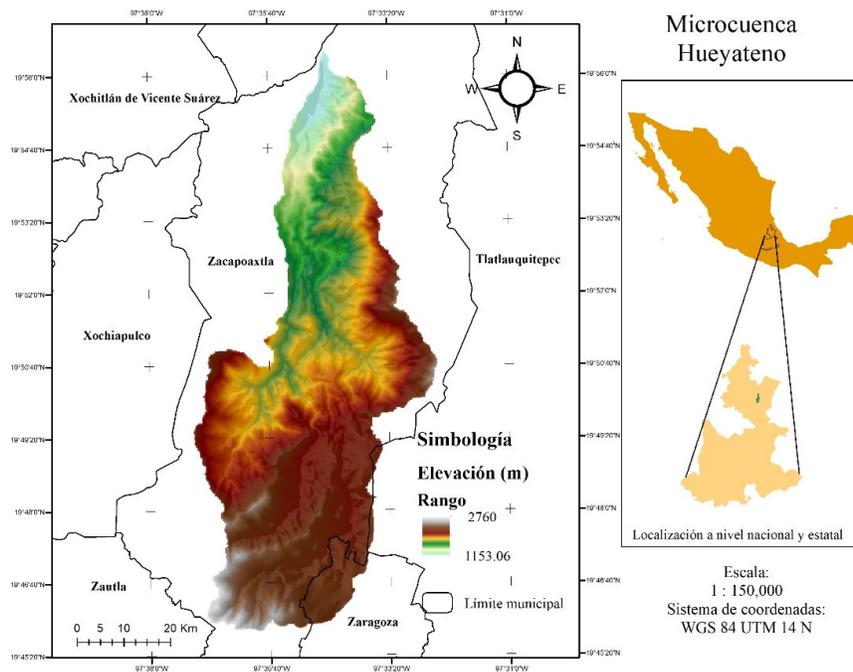
Según la Serie II de INEGI (2014) sobre edafología, el grupo Andosol es el que predomina en la zona de estudio con 74.70% de superficie, seguido de Phaeozem con 17.61%, Luvisol con 7.39% y Regosol con 0.30% (Figura 2). El clima predominante es templado húmedo, caracterizado por lluvias abundantes durante la temporada de verano (García, 2004). La precipitación media anual es de aproximadamente 1250 mm, mientras que la temperatura media anual es de alrededor de 16 °C. Estas condiciones climáticas están influenciadas por la época del año y las particularidades del relieve de la región (INEGI, 2010).

La agricultura y ganadería constituyen las principales actividades económicas de esta microcuenca (Arvizu-Barrón, Mayett, Martínez y Olivares, 2015), las cuales se encuentran ampliamente representados, particularmente en la zona alta y media. La cubierta vegetal está dominada por bosque mesófilo de montaña, bosque de pino-encino, bosque de pino y monocultivos agrícolas de densidad moderada a muy densa (INEGI, 2010; Pérez-Bravo, Salazar y Mora, 2010). El cauce principal de la microcuenca es de 33.15 km, pertenece a un sistema de orden 4, con una pendiente del 9.75% y un desnivel de 1526.62 m (Cuadro 1).

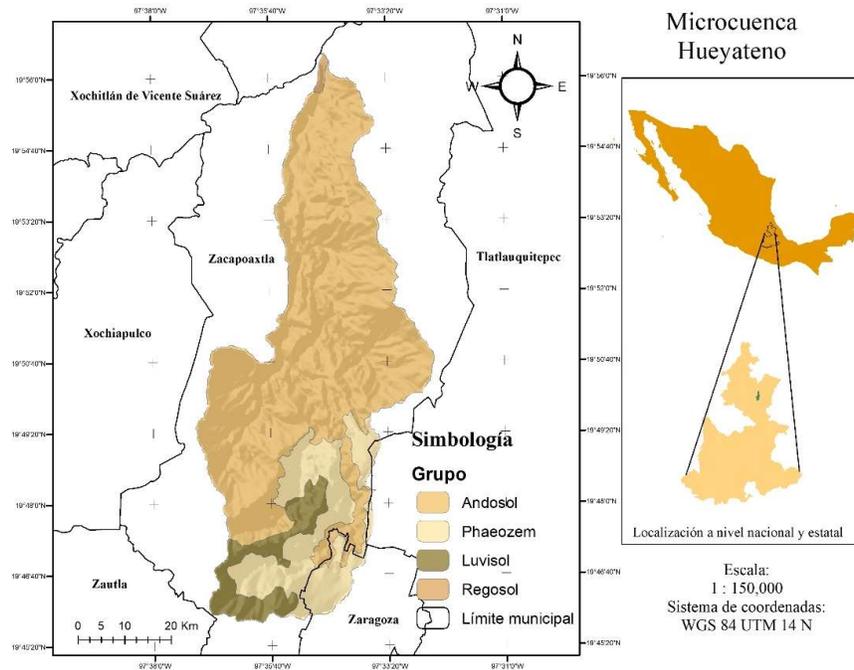
El cauce principal presenta una relación de bifurcación media de 2.05, indicando moderada ramificación y una curva hipsométrica tipo B, característica de un relieve en maduración (Figura 3).

### Adquisición y procesamiento de las imágenes satelitales

Para estudiar la dinámica del cambio del uso del suelo en la microcuenca durante un periodo de 30 años, desglosados entre 1993-2014, 2014-2023 y 1993-2023, se descargaron imágenes del satélite Landsat 5 y 8 a través del portal del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) cuyo nivel de procesamiento incluye correcciones radiométricas, geométricas y atmosféricas (Cuadro 2).



**Figura 1. Localización de la microcuenca del río Hueyateno.**  
**Figure 1. Location of the Hueyateno River micro-watershed.**

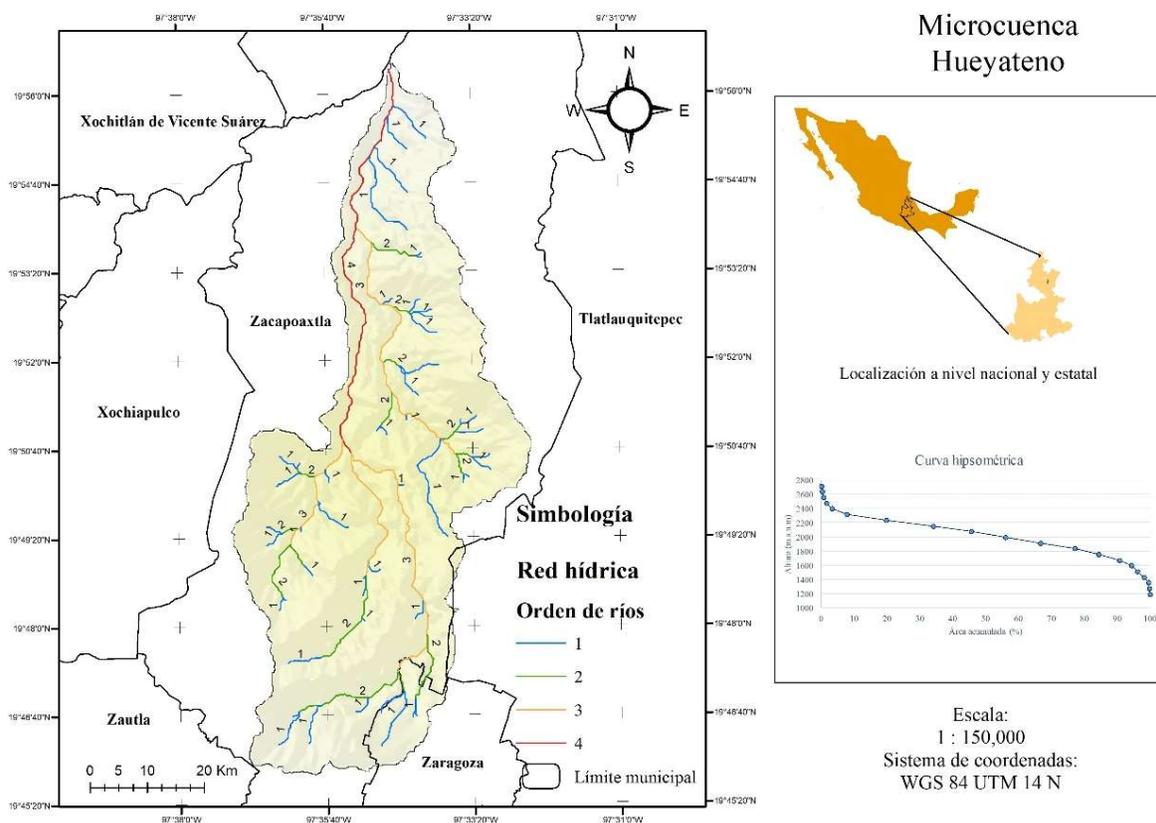


**Figura 2. Grupos de suelos en la microcuenca Hueyateno.**  
**Figure 2. Soil groups in the Hueyateno micro-watershed.**

Se seleccionaron las imágenes satelitales del área de estudio durante el periodo de secas para minimizar la presencia de nubosidad. En las imágenes seleccionadas no hubo presencia de cobertura nubosa, lo que permitió un análisis claro de los cambios en el uso del suelo. Se empleó la técnica de clasificación supervisada, basada en el algoritmo de máxima verosimilitud mediante ArcGIS 10.8. (ESRI, 2019). Este método fue seleccionado debido a su amplia aceptación y eficacia en la clasificación de imágenes satelitales, ya que maximiza la probabilidad de que un píxel pertenezca a una clase específica basándose en la distribución estadística de los datos de entrenamiento (Ahmad y Quegan, 2012; Valero-Medina y Alzate, 2019).

**Cuadro 1. Parámetros morfométricos de la microcuenca Hueyateno.**  
**Table 1. Morphometric parameters of the Hueyateno micro-watershed.**

	Parámetros	Unidad de medida	Valor
Microcuenca	Área total	ha	8347
	Perímetro	km	70.37
	Ancho promedio	km	2.52
	Coefficiente de compacidad	km	2.17
	Factor de forma	Adimensional	0.076
	Radio de circularidad	km	0.212
Cauce principal	Longitud	km	33.15
	Número de orden	Adimensional	4
	Pendiente	%	9.75
	Desnivel altitudinal	m	1526.62
	Relación de bifurcación media	Adimensional	2.05



**Figura 3. Distribución y orden de los ríos en la microcuenca Hueyateno.**  
**Figure 3. Distribution and stream order in the Hueyateno micro-watershed.**

### Clasificación y Validación de los Datos

Se consultaron las combinaciones de bandas sugeridas por la USGS (2021) para generar imágenes en falso color. En el caso de Landsat 5, se utilizaron las bandas 5, 4 y 3, mientras que para Landsat 8 se emplearon las bandas 6, 5 y 4. Esta combinación permitió resaltar, mediante distintos colores, cada una de las clases analizadas (bosque, agrícola, urbano y suelo desnudo) en la microcuenca Hueyateno. La clasificación fue validada a través de salidas a campo y la comparación con los conjuntos vectoriales de la serie I (INEGI, 1997) y la serie IV (INEGI, 2009) del uso del suelo y vegetación, asegurando la comparabilidad entre los mapas en los distintos periodos. Esto permitió una adecuada superposición y análisis de los cambios en el uso de suelo a lo largo del tiempo (Cuadro 3).

De acuerdo con Lillesand, Kiefer y Chipman (2004), para garantizar una validación confiable de las clases, se requiere un mínimo de 50 puntos seleccionados al azar por cada clase de uso y cobertura del suelo. En este estudio, se aplicó este criterio para las clases evaluadas. Adicionalmente, se utilizó la matriz de confusión para calcular el índice de Kappa, lo que permitió evaluar la precisión de la clasificación (Congalton, 1991) (Cuadro 4).

**Cuadro 2. Características de las imágenes Landsat utilizadas.**  
**Table 2. Characteristics of the Landsat images used.**

Año	Satélite	Sensor ID	Path/Row	Fecha de adquisición	Resolución (m)	Colección
1993	Landsat 5	TM	025/046	16 de diciembre	30	2 nivel 2
2014	Landsat 8	ETM+	025/046	26 de diciembre	30	2 nivel 2
2023	Landsat 8	ETM+	025/046	19 de diciembre	30	2 nivel 2

**Cuadro 3. Clases identificadas en la microcuenca Hueyateno.**  
**Table 3. Identified classes in the Hueyateno micro-watershed.**

Clase	Tipo de uso/cobertura
Bosque	Bosque mesófilo de montaña, bosque de pino-encino, bosque de pino.
Urbano	Viviendas, carreteras, infraestructura construida, asentamientos humanos.
Agrícola	Cultivos agrícolas
Suelo desnudo	Superficies desprovistas de vegetación, áreas de excavación, no incluye áreas urbanizadas.

### Detección, Estimación de Cambios y Matriz de Transición

Se utilizó el método de "comparación de clasificaciones" (Cingolani, Renison, Zak y Cabido, 2004), dentro de los límites de la microcuenca del río Hueyateno para analizar los cambios ocurridos a lo largo de 30 años. Para ello, se empleó el software ArcGIS 10.8 (ESRI, 2019) y la herramienta "Intersect" para superponer las capas correspondientes a los diferentes años analizados. Esto permitió la construcción de una matriz de transición de uso del suelo, proporcionando información precisa sobre las transiciones entre las 4 clases y facilitando la comparación entre las fechas estudiadas.

La fórmula utilizada para calcular la tasa de cambio anual de la cobertura del suelo, propuesta por la FAO (1996), es la siguiente:

$$TC = ((s_2/s_1)^{1/n} - 1) \times 100 \quad (1)$$

Donde: TC = Tasa de cambio (%),  $S_1$  = superficie inicial,  $S_2$  = Superficie final, n = diferencia de años entre fecha inicial y fecha final.

La matriz de transición con ganancia y pérdida de superficie enumera los cambios, permitiendo calcular la dinámica espacio-temporal de cada clase de uso de suelo en toda el área de estudio. Esta matriz, obtenida mediante la superposición de los mapas de cobertura de las fechas analizadas, nos facilita la identificación de áreas transformadas y de aquellas que se han mantenido sin cambios (Pontius, Shusas y McEachern, 2004).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

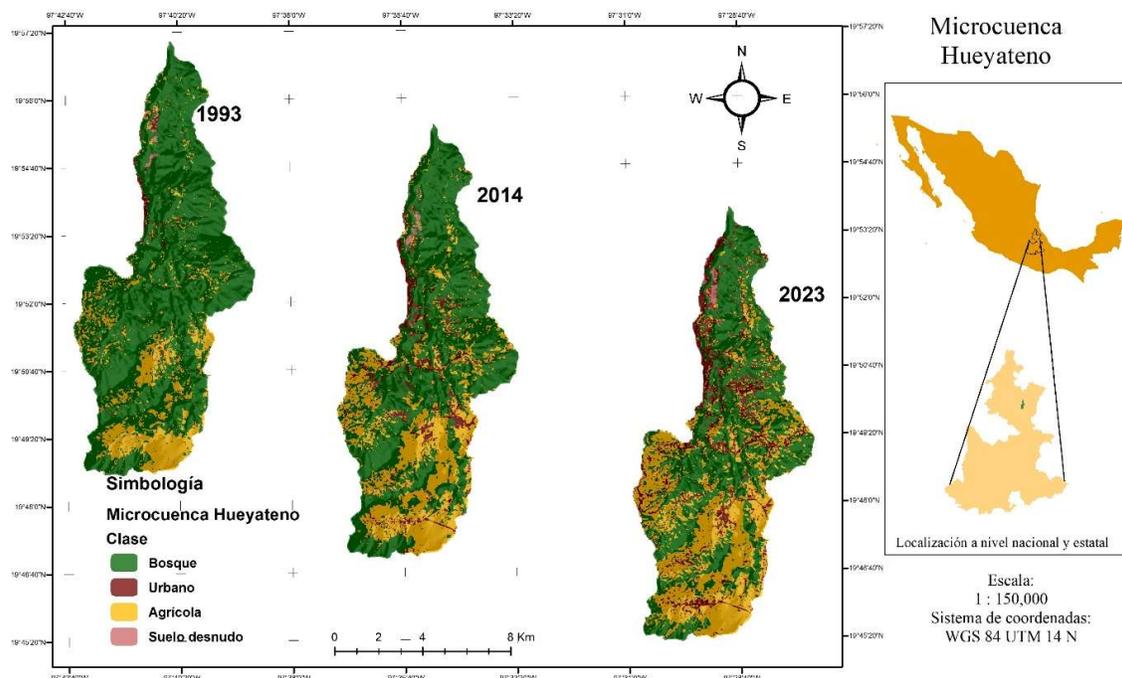
### Tendencia Espacial en la Cobertura y Uso de Suelo en la Microcuenca Hueyateno (1993-2023)

El análisis de cambio de cubierta y uso de suelo en la microcuenca Hueyateno nos muestra una transformación significativa en las tres décadas evaluadas (1993, 2014 y 2023) (Figura 4).

En el año 1993, el bosque era la clase de cobertura dominante, abarcando una gran extensión, especialmente en la zona norte y en las partes más elevadas del territorio. En cambio, para 2014, se observa una pérdida considerable de superficie boscosa, con una sustitución evidente por áreas agrícolas y urbanas, particularmente en la zona sur y suroeste de la microcuenca. Sin embargo, este patrón de transformación se intensifica hacia el año 2023, donde la cobertura forestal continúa reduciéndose, con una mayor fragmentación del paisaje y la expansión de otras clases de uso del suelo.

**Cuadro 4. Matriz de confusión para la clasificación de uso y cobertura del suelo.**  
**Table 4. Confusion matrix for land use and land cover classification.**

Clases	1	2	3	4	Total observado
1	A	B	C	D	R1
2	E	F	G	H	R2
3	I	J	K	L	R3
4	M	N	O	P	R4
Total clasificado	C1	C2	C3	C4	Total



**Figura 4. Uso y cobertura de suelo de la microcuenca Hueyateno de 1993 a 2023.**  
**Figure 4. Land use and land cover of the Hueyateno micro-watershed from 1993 to 2023.**

Las áreas más afectadas incluyen el sector sur, donde la conversión a otros usos es más pronunciada, y las zonas intermedias, donde se ha generado una fragmentación que altera la distribución original del bosque.

Las zonas urbanas experimentaron una expansión notable respecto a 1993 y 2014, evidenciando un proceso progresivo de urbanización descontrolada. Además, el aumento considerable de las áreas de suelo desnudo, especialmente en las zonas de transición entre bosques y áreas agrícolas, sugiere procesos de erosión o abandono de tierras previamente utilizadas para actividades agrícolas.

Se observó que el paisaje de la microcuenca está principalmente dominado por bosque y superficies agrícolas (Figura 5), lo que coincide con los hallazgos realizados en otras cuencas hidrográficas donde el crecimiento urbano y agrícola aminoró la superficie forestal, González-García Sancho, Nájera, Murray y Marceléño (2016) reportaron que la cobertura de la vegetación natural y tierras de cultivo representaron el paisaje de la cuenca estudiada. Además, los resultados identificaron una dinámica de cambio centrada a la transformación de vegetación natural a tierras agrícolas y la expansión de zonas urbanas, patrones similares a los reportados por Corozo-Hurtado, Merino, Estupiñán y Velasco (2024) y Galeana-Pizaña, Corona y Ordóñez (2009), donde los cambios en los tipos de cobertura vegetal hacia antrópicos fueron los más relevantes.

En la cuenca del río Grande de Comitán-Lagos, se observó que la reducción de la cobertura forestal compromete la seguridad hídrica, lo que hace necesario implementar estrategias de manejo sostenible (Ávila-García *et al.*, 2020). De manera similar, en la zona metropolitana de la Ciudad de México, la sobreexplotación de los recursos hídricos y la expansión urbana descontrolada han generado impactos desiguales en la seguridad hídrica, afectando especialmente a comunidades periurbanas de bajos ingresos (Chen y Bilton, 2022). Estos hallazgos resaltan la necesidad de políticas integrales que incorporen sistemas de gestión del agua más sostenibles y equitativos, aspecto clave también en nuestra zona de estudio para mitigar los efectos de la urbanización sobre los servicios ecosistémicos.

Los procesos de urbanización y la conversión de tierras a uso agrícola constituyen tendencias recurrentes en cuencas con características similares, impulsadas por factores socioeconómicos y de gestión territorial. Estos cambios pueden tener repercusiones significativas en la seguridad hídrica y la sostenibilidad de los recursos naturales en la microcuenca Hueyateno, ya que la reducción de la cobertura boscosa y el incremento de suelo desnudo, derivados de prácticas extractivas no reguladas, pueden comprometer la capacidad de retención de agua y la estabilidad edáfica.



**Figura 5. Características de la microcuenca Hueyateno 2023.** A) Fragmentación, B) Superficies agrícolas, C) Bosque y D) Extractivismo.

**Figure 5. Characteristics of the Hueyateno micro-watershed in 2023.** A) Fragmentation, B) Agriculture areas, C) Forest, and D) Extractivism.

### Precisión de la Clasificación

La evaluación de la precisión es fundamental en la clasificación de imágenes satelitales para determinar la correcta asignación de las clases identificadas (Guerrero, Masera y Mas, 2008; Rwanga y Ndambuki, 2017). La validación se realizó utilizando imágenes Landsat 5 y 8 como referencia y un muestreo aleatorio simple con 50 puntos por clase, lo que permitió obtener la matriz de confusión y el índice de Kappa.

Según Pontius (2000), un coeficiente de Kappa superior a 0.40 se considera aceptable. En este estudio, los coeficientes obtenidos para las imágenes Landsat de 1993, 2014 y 2023 fueron de 0.88, 0.91 y 0.93, respectivamente, lo que indican una alta confiabilidad (Cuadro 5, 6 y 7), nuestros valores fueron similares a los reportados por Arias-Muñoz *et al.* (2024) y Hua (2017).

### Comparación entre Clases de Cobertura y Uso de Suelo (1993-2023)

En el análisis de los años 1990, 2014 y 2023, se observa que el bosque sigue siendo la categoría principal de CCUS, aunque con una reducción considerable a lo largo del tiempo. Entre 1990 y 2023, esta clase disminuyó su cobertura, mientras que el área agrícola y urbana aumentaron de forma notable, evidenciando una tendencia de transformación del bosque original en otras coberturas.

En términos de cambio porcentual, el bosque mostró una disminución progresiva que pasó del 80.05% en 1993 al 49.90% en 2023, representando la pérdida más significativa de cobertura forestal en la zona de estudio. En cambio, las zonas urbanas y agrícolas registraron un aumento considerable, pasando de 1.52% en 1993 a 12.72% en 2023 y 17.67% en 1993 a 36.84% en 2023, consolidándose como las categorías con mayores transformaciones, por otro lado, el suelo desnudo presentó fluctuaciones menores durante el periodo analizado (Cuadro 8).

**Cuadro 5. Matriz de confusión y métricas de precisión y concordancia de las imágenes satelitales.**  
**Table 5. Confusion matrix and accuracy metrics for the satellite imagery.**

		Año - 1993							
		Verdad imagen							
	Clase	Bosque	Urbano	Agrícola	Suelo desnudo	Total	Precisión del usuario	Índice kappa	Precisión global
Verdad terreno	Bosque	46	1	3	0	50	0.92	0.88	0.91
	Urbano	4	46	0	0	50	0.92	-	-
	Agrícola	3	0	46	1	50	0.92	-	-
	Suelo desnudo	2	0	4	44	50	0.88	-	-
	Total	55	47	53	45	200	0	-	-
	Precisión del productor	0.84	0.98	0.87	0.98	0	0.91	-	-

El incremento de las zonas agrícolas y urbanas en la microcuenca Hueyateno se puede relacionar con actividades humanas, como la expansión de terrenos para cultivo y el aprovechamiento maderero, lo que ha resultado en una disminución de la cobertura boscosa. García-Orozco, Gutiérrez, Juan y Balderas (2011) menciona que la pérdida de cobertura forestal en las microcuencas está vinculada al crecimiento poblacional y a la satisfacción de necesidades básicas, siendo una de las principales la producción de alimentos.

Como se observa en la Figura 6, el análisis de cambios entre estos años respalda la tendencia de pérdida de cobertura forestal, un patrón consistente que indican un proceso de deforestación gradual debido a factores antropogénicos (Biggs, Dunne, Roberts y Matricardi, 2008). En la zona de estudio predominan el bosque mesófilo de montaña y bosque de pino-encino, pero su notable reducción en el periodo de 30 años es motivo de preocupación. Estos ecosistemas son importantes reservorios de flora y fauna, y aún existe un desconocimiento significativo sobre la riqueza taxonómica de las especies que habitan en ellos (Cruz-Elizalde, Ochoa, Flores, León y Navarro, 2022; Williams-Linera, Manson y Isonza, 2016).

Esta dinámica de CCUS preocupa por la conservación de los ecosistemas forestales en el área de estudio. Según Ceballos-Pérez (2021), un manejo forestal comunitario es ideal para reducir la transformación de bosques a usos agrícolas. En la microcuenca Hueyateno, en los últimos años se ha observado el incremento de monocultivos, lo que pone en riesgo, no solo los bosques sino también la calidad del suelo y del agua.

**Cuadro 6. Matriz de confusión y métricas de precisión y concordancia de las imágenes satelitales.**  
**Table 6. Confusion matrix and accuracy metrics for the satellite imagery.**

		Año - 2014							
		Verdad imagen							
	Clase	Bosque	Urbano	Agrícola	Suelo desnudo	Total	Precisión del usuario	Índice kappa	Precisión global
Verdad Terreno	Bosque	48	1	1	0	50	0.96	0.91	0.93
	Urbano	2	47	0	1	50	0.94	-	-
	Agrícola	4	0	46	0	50	0.92	-	-
	Suelo desnudo	1	1	2	46	50	0.92	-	-
	Total	55	49	49	47	200	0.00	-	-
	Precisión del productor	0.87	0.96	0.94	0.98	0	0.94	-	-

**Cuadro 7. Matriz de confusión y métricas de precisión y concordancia de las imágenes satelitales.**  
**Table 7. Confusion matrix and accuracy metrics for the satellite imagery.**

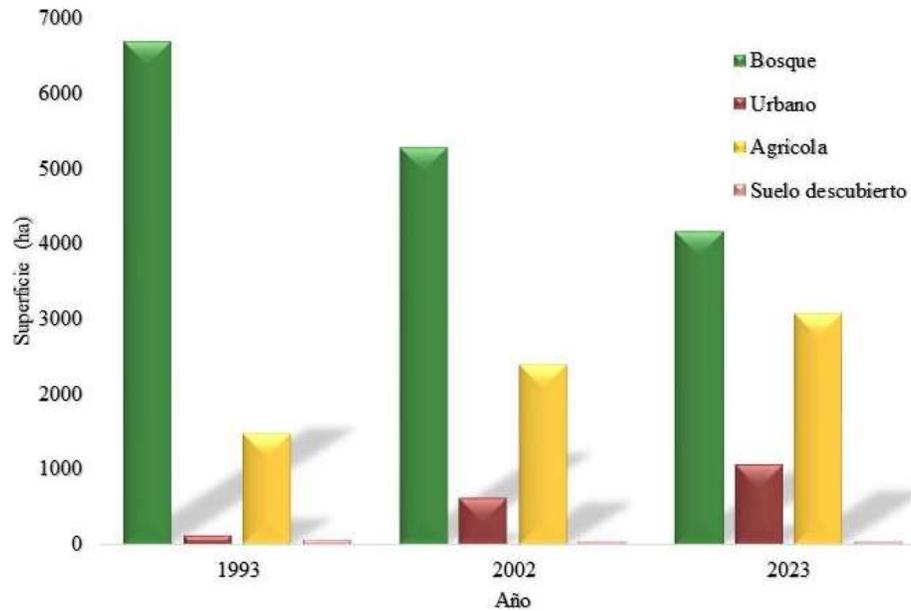
		Año - 2023				Total	Precisión del usuario	Índice kappa	Precisión global
Clase		Verdad imagen							
		Bosque	Urbano	Agrícola	Suelo desnudo				
Verdad Terreno	Bosque	48	1	1	0	50	0.96	0.94	0.95
	Urbano	1	47	1	0	50	0.96	-	-
	Agrícola	1	0	48	1	50	0.96	-	-
	Suelo desnudo	2	0	1	47	50	0.94	-	-
	Total	52	48	51	48	200	0.00	-	-
Precisión del productor		0.92	0.98	0.94	0.98	0	0.95	-	-

La tasa de cambio (TC) refleja importantes tendencias en el uso y cobertura del suelo entre 1993 y 2023 en la microcuenca Hueyateno (Cuadro 9). Los resultados más destacados se observan en la categoría de áreas urbanas y agrícolas, que registraron una tasa de cambio positiva considerable de más del 2 y 5% respectivamente, entre años lo que confirma un crecimiento sostenido y significativo durante las tres décadas analizadas. En contraste, la categoría de bosque muestra una tasa de cambio negativa, indicando una constante reducción de su superficie. Previamente, Figueroa-Jáuregui, Ibáñez, Arteaga, Arellano y Vázquez (2011) presentan fluctuaciones de la tasa de cambio de los bosques (bosque mesófilo de montaña, bosque de pino y bosque de encino) con pérdidas y recuperaciones de superficie durante un periodo de 35 años.

Las actividades humanas han intensificado la fragmentación del paisaje, especialmente debido al crecimiento urbano descontrolado que degrada la vegetación natural. La falta de planificación adecuada prioriza el uso de zonas para el crecimiento urbano sobre la conservación ecológica, reduciendo la biodiversidad y los recursos naturales (Abad-Auquilla, 2020). Estos cambios tienen implicaciones relevantes para la conservación ambiental, ya que afecta la provisión de servicios ecosistémicos esenciales tanto para la población humana como para la flora y fauna de la zona de estudio.

**Cuadro 8. Distribución del uso y cobertura del suelo por año en hectárea y porcentaje.**  
**Table 8. Annual land use and land cover distribution in hectares and percentage.**

Clase	Superficie	Año		
		1993	2014	2023
Bosque	ha	6688.11	5292.54	4169.11
	%	(80.05)	(63.35)	(49.90)
Urbano	ha	127.398	629.522	1062.55
	%	(1.52)	(7.53)	(12.72)
Agrícola	ha	1476.54	2399.08	3078.21
	%	(17.67)	(28.71)	(36.84)
Suelo desnudo	ha	62.99	33.9	45.1661
	%	(0.75)	(0.41)	(0.54)



**Figura 6. Variación de la superficie del uso y cobertura del suelo para el periodo 1993-2023.**  
**Figure 6. Variation in land use and land cover area for the period 1993-2023.**

### Matriz de Transición de la Microcuenca Hueyateno

Los Cuadros 10, 11 y 12 ilustran la información sobre los cambios en las superficies totales de las diferentes unidades de uso del suelo. Pero sobre todo proporcionan los valores de las ganancias y pérdidas de superficies por cada clase, así como las de las zonas sin cambios.

Entre 1993 y 2014, el bosque perdió 1610.45 ha, mientras que el área urbana y la agrícola aumentaron en 553.47 ha y 1257.62 ha, respectivamente. La mayor conversión de suelo se dio del bosque hacia áreas agrícolas y urbanas, reflejando una fuerte presión antrópica sobre la cobertura forestal (Cuadro 10).

Los principales cultivos de la microcuenca Hueyateno corresponden a maíz, papá y haba, debido a la rentabilidad para los productores comerciales (Lara-De La Calleja, Mejía y García, 2024; Mejía-Méndez y Castellanos, 2018), estos cultivos no solo representan una fuente importante de ingresos económicos, sino también un componente clave en la seguridad alimentaria local. Sin embargo, su producción está estrechamente

**Cuadro 9. Variación de superficie perdida entre años y tasa de cambio anual durante el periodo 1993-2023.**  
**Table 9. Variation of lost area between years and annual change rate during the period 1993-2023.**

Clase	Superficie	Año		
		1993-2014	2014-2023	1993-2023
Bosque	ha	-1395.57	-1123.43	-2519.00
	TC	-1.11	-2.62	-1.56
Urbano	ha	922.54	679.13	1601.67
	TC	2.34	2.81	2.48
Agrícola	ha	502.12	433.03	935.15
	TC	7.90	5.99	7.33
Suelo desnudo	ha	-29.09	11.27	-17.82
	TC	-2.91	3.24	-1.10

**Cuadro 10. Matriz de transición de uso y cobertura del suelo (1993-2014).**  
**Table 10. Land use and land cover transition matrix (1993-2014).**

Año	Clase (ha)	2014				
		Bosque	Urbano	Agrícola	Suelo desnudo	Total de superficie con pérdida
1993	Bosque	5071.51	366.95	1216.31	27.20	1610.45
	Urbano	38.55	73.23	13.72	1.05	53.33
	Agrícola	160.42	173.32	1138.79	2.25	335.99
	Suelo desnudo	18.42	13.20	27.59	5.35	59.21
	Total de superficie con ganancia	217.39	553.47	1257.62	30.50	-

vinculada a la disponibilidad de recursos naturales, como el suelo y el agua, los cuales han presentado signos de degradación en las últimas décadas debido al cambio de uso de suelo y la implementación de prácticas agrícolas intensivas. En este sentido, el análisis de la dinámica del cambio en el uso del suelo resulta fundamental para comprender las tendencias de deterioro de los ecosistemas y sus implicaciones en la sostenibilidad de estos recursos (Meza-Rodríguez, Olgúin, Quintero, Sánchez y Villalvazo, 2023). Esta dinámica podría comprometer la sostenibilidad de la producción agrícola en la región, especialmente si no se implementan medidas adecuadas para los cultivos como lo es el manejo agroforestal recomendado para la zona geográfica donde se encuentra la microcuenca (Hernández-Ordoñez, Gutiérrez, Ortiz, Sánchez y Angeles, 2017).

La matriz de transición muestra que entre 2014 y 2023, el bosque perdió 1302.16 ha, mientras que el área urbana y la agrícola aumentaron en 670.68 ha y 1110.75 ha, respectivamente (Cuadro 11). La conversión de bosque a suelo agrícola y urbano continuó, evidenciando una tendencia sostenida de reducción de la cobertura forestal.

Para el periodo de análisis (1993-2023), la microcuenca experimentó transformaciones significativas en su uso y cobertura del suelo (Cuadro 12). El bosque, que en 1993 cubría una superficie predominante con más de 6000 ha, mostró una notable reducción de 2590.80 ha hacia 2023, principalmente convertidas en áreas agrícolas (1914.43 ha) y urbanas (656.10 ha). Esta pérdida refleja el impacto de actividades antropogénicas como la expansión de tierras a usos agrícolas y el crecimiento urbano, lo que sugiere una presión constante sobre las áreas boscosas. Los datos muestran que, a lo largo de 30 años, el bosque experimentó una ganancia de solo 74.57 ha, en contraste con una reducción de más de 2500 hectáreas.

A lo largo de 30 años, la superficie urbana ha mostrado un incremento constante. Entre 1993 y 2014, la ganancia urbana fue de 553.47 ha, mientras que en el periodo 2014-2023 aumentó a 670.68 ha. En total, de 1993 a 2023, la superficie urbana creció en 973.83 ha, lo que refleja una expansión sostenida a lo largo del tiempo. Sin embargo, también se observa que algunas áreas clasificadas como urbanas experimentaron cambios hacia usos agrícolas y, en menor medida, hacia suelo desnudo. Esto podría deberse a procesos de abandono, reconfiguración territorial o cambios en las actividades productivas, especialmente en comunidades rurales donde la infraestructura construida no siempre es permanente ni consolidada y la ocupación del suelo puede transformarse en función de las necesidades socioeconómicas locales.

**Cuadro 11. Matriz de transición de uso y cobertura del suelo (2014-2023).**  
**Table 11. Land use and land cover transition matrix (2014-2023).**

Año	Clase (ha)	2023				
		Bosque	Urbano	Agrícola	Suelo desnudo	Total de superficie con pérdida
2014	Bosque	3985.74	323.27	950.35	28.54	1302.16
	Urbano	80.58	388.69	156.50	1.91	238.99
	Agrícola	89.05	337.44	1966.29	3.64	430.13
	Suelo desnudo	10.96	9.97	3.90	11.00	24.84
	Total de superficie con ganancia	180.59	670.68	1110.75	34.08	-

**Cuadro 12. Matriz de transición de uso y cobertura del suelo (1993-2023).**  
**Table 12. Land use and land cover transition matrix (1993-2023).**

Año	Clase (ha)	2023				
		Bosque	Urbano	Agrícola	Suelo desnudo	Total de superficie con pérdida
1993	Bosque	4091.37	656.10	1914.43	20.27	2590.80
	Urbano	17.38	84.70	15.73	8.58	41.69
	Agrícola	53.95	293.42	1122.17	5.26	352.63
	Suelo desnudo	3.24	24.31	25.95	10.98	53.50
	Total de superficie con ganancia	74.57	973.83	1956.12	34.11	-

Las transformaciones en el uso del suelo en la microcuenca del río Hueyateno han tenido repercusiones importantes en la calidad de vida local. La deforestación intensiva en la zona sur ha disminuido la capacidad de infiltración del suelo, afectando la recarga de acuíferos y reduciendo la disponibilidad de agua para consumo humano y actividades agrícolas, lo que ha generado conflictos por el acceso al recurso, especialmente en épocas de sequía.

En paralelo, debido a la expansión urbana tanto hacia el sur como hacia el norte de la zona de estudio, se han comercializado terrenos en pendientes pronunciadas, lo que ha facilitado la construcción de viviendas en zonas inestables, Rojas-Santiago y Lugo, (2022) mencionan que la actividad antrópica es un factor que puede generar alteraciones en el relieve, lo que a su vez provoca inestabilidad en las laderas. Aunque esta transformación ofrece una alternativa económica, incrementa considerablemente los riesgos de deslizamientos de tierra y erosión, comprometiendo la seguridad de las comunidades locales y generando costos adicionales para la gestión de desastres.

Además, esta urbanización ha acelerado la deforestación en áreas clave para la estabilidad del suelo y la regulación hídrica, lo que agrava la fragmentación de los ecosistemas y la pérdida de biodiversidad, factores fundamentales para el equilibrio ecológico de la microcuenca (Li, Hoerbinger, Weissteiner, Peng y Rauch, 2020).

## CONCLUSIONES

Entre 1993 y 2023, la microcuenca Hueyateno experimentó cambios significativos en su uso y cobertura del suelo, impulsados principalmente por actividades humanas. La expansión urbana y agrícola se intensificó de manera descontrolada, resultando en una pérdida significativa de 2590.80 ha de cobertura boscosa, con un impacto notable en los bosques mesófilos de montaña, de pino y de pino-encino. Además, este proceso evidencia una dinámica de transformación que prioriza el desarrollo económico sobre la conservación de ecosistemas clave, vulnerables y ricos en biodiversidad.

Los hallazgos obtenidos pueden aplicarse a otras microcuencas con características similares, especialmente aquellas que enfrentan presiones por expansión agrícola y urbana. La identificación de patrones de transformación del paisaje permite anticipar tendencias y desarrollar estrategias de manejo que contribuyan a mitigar la pérdida de cobertura forestal en contextos comparables. Por lo tanto, estos resultados pueden servir como base para el diseño de planes de ordenamiento territorial que promuevan la conservación de los remanentes de vegetación y una planificación sostenible del uso del suelo en el área de influencia de la Microcuenca Hueyateno.

## DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

## CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

## DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos utilizados y analizados durante el presente estudio están disponibles a solicitud razonable del autor correspondiente.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

## FINANCIACIÓN

La financiación fue recabada y facilitada por las instituciones a las que pertenecen los autores con fines académicos.

## CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización, C.F.L.B., R.C.V. Escritura, revisión y edición: C.F.L.B., R.C.C.V., J.V.R.T. Metodología: C.F.L.B., R.C.C.V. Software: C.F.L.B., R.C.C.V. Supervisión: R.C.C.V., J.V.R.T.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo contó con el apoyo del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) para la beca de Doctorado de Ciencias Ambientales otorgada a Carlos Felipe Luna Bautista. Al posgrado en Ciencias Ambientales del Instituto de Ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

## LITERATURA CITADA

- Abad-Auquilla, A. (2020). El cambio de uso de suelo y la utilidad del paisaje periurbano de la cuenca del río Guayllabamba en Ecuador. *Revista de Ciencias Ambientales*, 54(2), 68-91. <https://doi.org/10.15359/rca.54-2.4>
- Ahmad, A., & Quegan, S. (2012). Analysis of Maximum Likelihood classification technique on Landsat 5 TM satellite data of tropical land covers. En *2012 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE)* (pp. 289-294). Piscataway, NJ, USA: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCSCE.2012.6487156>
- Arias-Muñoz, P., Escolano, S., & Saz, M. Á. (2024). Tendencias de cambio de usos y coberturas de suelo en la cuenca hidrográfica media-alta del río Mira en Ecuador. *Investigaciones Geográficas*, 81, 155-179. <https://doi.org/10.14198/INGEO.25248>
- Arvizu-Barrón, E., Mayett-Moreno, Y., Martínez-Flores, J. L., & Olivares-Benítez, E. (2015). Mercados rurales agrícolas de Huixcolotla y Zacapoaxtla, Puebla: Potencial para el desarrollo económico regional. *Revista Global de Negocios*, 3(2), 71-82.
- Astou Sambou, M. H., Albergel, J., Vissin, E. W., Liersch, S., Koch, H., Szantoi, Z., ... & Toure, I. (2023). Prediction of land use and land cover change in two watersheds in the Senegal River basin (West Africa) using the Multilayer Perceptron and Markov chain model. *European Journal of Remote Sensing*, 56(1), 2231137. <https://doi.org/10.1080/22797254.2023.2231137>
- Ávila-García, D., Morató, J., Pérez-Maussán, A. I., Santillán-Carvantes, P., Alvarado, J., & Comín, F. A. (2020). Impacts of alternative land-use policies on water ecosystem services in the Río Grande de Comitán-Lagos de Montebello watershed, Mexico. *Ecosystem Services*, 45, 2101179. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101179>
- Banti, M. A., Kiachidis, K., & Gemtzi, A. (2019). Estimation of spatio-temporal vegetation trends in different land use environments across Greece. *Journal of Land Use Science*, 14(1), 21-36. <https://doi.org/10.1080/1747423X.2019.1614687>
- Biggs, T. W., Dunne, T., Roberts, D. A., & Matricardi, E. (2008). The rate and extent of deforestation in watersheds of the Southwestern Amazon Basin. *Ecological Applications*, 18(1), 31-48. <https://doi.org/10.1890/06-1689.1>
- Ceballos-Pérez, S. G. (2021). Impacto territorial del manejo forestal comunitario en la Sierra Norte de Puebla, 2003-2017. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 17(86). <https://doi.org/10.11144/Javeriana.cdr17.itmf>
- Chen, Y., & Bilton, A. M. (2022). Water stress, peri-urbanization, and community-based water systems: A reflective commentary on the metropolitan area of Mexico City. *Frontiers in Sustainable Cities*, 4, 790633. <https://doi.org/10.3389/frsc.2022.790633>
- Cingolani, A. M., Renison, D., Zak, M. R., & Cabido, M. R. (2004). Mapping vegetation in a heterogeneous mountain rangeland using Landsat data: An alternative method to define and classify land-cover units. *Remote Sensing of Environment*, 92(1), 84-97. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.05.008>
- Congalton, R. G. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37(1), 35-46. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90048-B](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90048-B)
- Corozo-Hurtado, J. J., Merino-Córdova, P. A., Estupiñán-Cox, B. F., & Velasco-Quiñónez, J. D. (2024). Análisis multitemporal de la dinámica de cobertura/uso de suelo de la cuenca del río Esmeraldas. *Conciencia Digital*, 7(2), 178-195. <https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v7i2.3021>
- Cruz-Elizalde, R., Ochoa-Ochoa, L. M., Flores-Villela, O., León-Paniagua, L., & Navarro-Sigüenza, A. G. (2022). Amenazas al bosque mesófilo de montaña en México y la importancia de estudios multitaxonómicos. *Biología y Sociedad*, 6(11), 42-49.
- ESRI (2019). *ArcGis User's Guide. Released 10.8*. Redlands, CA, USA: Environmental Systems Research Institute.
- FAO (Food and Agriculture Organization). (1996). *Forest resources assessment 1990: Survey of tropical forest cover and study of change*

- processes (No. 130). Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Figueroa-Jáuregui, M., Ibáñez-Castillo, L. A., Arteaga-Ramírez, R., Arellano-Monterrosas, J. L., & Vázquez-Peña, M. (2011). Cambio de uso de suelo en la cuenca de San Cristóbal de las Casas, México. *Agrociencia*, 45(5), 531-544.
- Galeana-Pizaña, J. M., Corona-Romero, N., & Ordóñez-Díaz, J. A. B. (2019). Análisis dimensional de la cobertura vegetal-uso de suelo en la cuenca del río Magdalena. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 10(53), 137-158. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i53.624>
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)* (5th ed.). México: Instituto de Geografía-UNAM.
- García-Orozco, J. A., Gutiérrez-Cedillo, J. G., Juan-Pérez, J. I., & Balderas-Plata, M. A. (2011). Cambio de uso del suelo en una microcuenca del altiplano mexicano. *Papeles de Geografía*, 53, 125-135.
- González-García Sancho, A. G., Nájera-González, O., Murray-Núñez, R. M., & Marceleño-Flores, S. M. L. (2016). Dinámica espacio-temporal de la cobertura y uso del suelo en una cuenca hídrica. *CIBA Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 5(9), 29. <https://doi.org/10.23913/ciba.v5i9.42>
- Gordillo-Ruiz, M. C., & Castillo-Santiago, M. A. (2016). Cambio de uso del suelo en la cuenca del río Sabinal, Chiapas, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 4(10), 39-49. <https://doi.org/10.19136/era.a4n10.803>
- Guerrero, G., Maser, O., & Mas, J. F. (2008). Land use/land cover change dynamics in the Mexican highlands: Current situation and long term scenarios. In M. Paegelow & M. T. C. Olmedo (Eds.), *Modelling environmental dynamics* (pp. 57-76). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-68498-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-540-68498-5_2)
- Hassan, Z., Shabbir, R., Ahmad, S. S., Malik, A. H., Aziz, N., Butt, A., & Erum, S. (2016). Dynamics of land use and land cover change (LULCC) using geospatial techniques: A case study of Islamabad Pakistan. *SpringerPlus*, 5(1), 812. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-2414-z>
- Hernández-Ordoñez, J. O., Gutiérrez-Castorena, M. del C., Ortiz-Solorio, C. A., Sánchez-Guzmán, P., & Angeles-Cervantes, E. R. (2017). Calidad de Andosols en sistemas forestal, agroforestal y agrícola con diferentes manejos en Zacatlán, Puebla. *Terra Latinoamericana*, 35(2), 179-189. <https://doi.org/10.28940/terra.v35i2.201>
- Hinojosa-Pérez, M. G., Acevedo-Sandoval, O. A., Vázquez-Cuevas, G. M., Bravo-Cadena, J., Navarro-Gómez, H. I., Razo-Zárate, R., & Valencia-Pulido, S. B. (2024). Dynamics of land use change and landcover in a micro-watershed from the Pantepec river, Hidalgo, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 30(3), 73-90. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2024.03.005>
- Hua, A. K. (2017). Land use land cover changes in detection of water quality: A study based on remote sensing and multivariate statistics. *Journal of Environmental and Public Health*, 2017, 7515130. <https://doi.org/10.1155/2017/7515130>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (1997). *Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, Serie I (continuo nacional)*. Instituto Nacional de Ecología. Consultado el 22 de febrero, 2024, desde <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/usv250kcs1agw.html>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2009). *Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, Serie IV (continuo nacional)*. Instituto de Ecología. Consultado el 22 de febrero, 2024, desde <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/usv250ks4gw.html>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2010). *Compendio de información geográfica municipal 2010: Zacapoaxtla, Puebla*. Puebla: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2014). *Conjunto de datos vectoriales edafológico, escala 1:250000, Serie II (continuo nacional)* (2nd ed.). Instituto de Ecología. Consultado el 22 de febrero, 2024, desde [http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis\\_root/edafo/tsuelo/eda250s2gw](http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/edafo/tsuelo/eda250s2gw)
- Jaramillo-Monroy, F., Wehncke, E. V., Flores-Armillas, V. H., Pohle-Morales, O. M., & López-Medellín, X. (2021). Enfoque regional de manejo integrado del agua en la microcuenca El Pantano, Morelos, México. *Economía Sociedad y Territorio*, 21(65), 275-304. <https://doi.org/10.22136/est20211625>
- Lara-De La Calleja, M. A., Mejía-Méndez, G., & García-Martínez, L. M. (2024). Vulnerabilidad y retos de sustentabilidad de la producción agrícola en comunidades rurales de México, caso de estudio con productores de Zacapoaxtla, Puebla. *Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan*, 12(1), 213-231. <https://doi.org/10.47808/revistabiologico.v12i1.552>
- Leija, E. G., Pavón, N. P., Sánchez-González, A., Rodríguez-Laguna, R., & Angeles-Pérez, G. (2021). Dinámica espacio-temporal de uso, cambio de uso y cobertura de suelo en la región centro de la Sierra Madre Oriental: Implicaciones para una estrategia REDD+. *Revista Cartográfica*, 102, 43-68. <https://doi.org/10.35424/rcarto.i102.832>
- Li, J., Hoerbinger, S., Weissteiner, C., Peng, L., & Rauch, H. P. (2020). River restoration challenges with a specific view on hydromorphology. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 14(5), 1033-1038. <https://doi.org/10.1007/s11709-020-0665-9>
- Lillesand, T., Kiefer, R., & Chipman, J. (2004). *Remote sensing and image interpretation* (5th ed.). Chichester, England: John Wiley & Sons.
- Lim, L., & Sasaki, Y. (2016). Review of research trends in watershed-based land use analysis. *Journal of JSCE*, 4(1), 227-242. [https://doi.org/10.2208/journalofjsce.4.1\\_227](https://doi.org/10.2208/journalofjsce.4.1_227)
- Mejía-Méndez, G., & Castellanos-Suárez, J. A. (2018). Costos de producción y rentabilidad del cultivo de la papa en el municipio de Zacapoaxtla, Puebla. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(8), 1651-1661. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i8.1721>
- Meza-Rodríguez, D., Olguín-López, J. L., Quintero-Gradilla, S. D., Sánchez-Rodríguez, E. V., & Villalvazo-López, V. M. (2023). Dinámica temporal de cambio de uso de suelo y vegetación en la cuenca Julupán en el estado de Colima. *Terra Latinoamericana*, 41, 1-15. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1317>
- Pérez-Bravo, R., Salazar, G. A., & Mora-Guzmán, E. (2010). Orquídeas de Las Lomas-La Manzanilla, Sierra Madre Oriental, Puebla, México. *Botanical Sciences*, 87, 125-129. <https://doi.org/10.17129/botsci.320>
- Pérez-Miranda, R., Cruz-Bello, G. M., Moreno-Sánchez, F., González-Hernández, A., & Romero-Sánchez, E. M. (2012). Cambios de vegetación y uso de suelo en la cuenca Río Bravo-San Juan, Coahuila (1993 a 2008). *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(10), 25-40. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v3i10.523>
- Pontius, R. G. (2000). Quantification error versus location error in comparison of categorical maps. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 66(8), 1011-1016.
- Pontius, R. G., Shusas, E., & McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 101(2-3), 251-268. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.09.008>
- Rojas-Santiago, E., & Lugo-Morin, D. R. (2022). Dinámica de los residuos sólidos en el municipio de Zacapoaxtla, Puebla: Un análisis para la gestión de riesgo de desastre. *Revista Internacional de Sostenibilidad*, 4(1), 29-44. <https://doi.org/10.18848/2642-2719/CGP/v04i01/29-44>
- Romero-Rodríguez, J., Aguilar-Ávila, J., Santoyo-Cortés, V. H., & Diakite, L. (2022). Transiciones del cambio de uso de suelo en el estado de

- Puebla (1980-2016), México. *Investigaciones Geográficas*, 109, 1-7.
- Rwanga, S. S., & Ndambuki, J. M. (2017). Accuracy assessment of land use/land cover classification using remote sensing and GIS. *International Journal of Geosciences*, 8(4), 611-622. <https://doi.org/10.4236/ijg.2017.84033>
- Sotelo-Caro, O., Chichia-González, J., Sorani, V., & Flores-Palacios, A. (2015). Cambios en la dinámica de deforestación de la subcuenca de un río en México: La imposibilidad de recuperación de los hábitats originales después del cese de la deforestación. *Revista de Geografía Norte Grande*, 61, 221-227. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022015000200012>
- USGS (United States Geological Survey). (2021). Common Landsat band combinations. Consultado el 22 de febrero, 2024, desde <https://www.usgs.gov/media/images/common-landsat-band-combinations>
- Valero-Medina, J. A., & Alzate-Atehortúa, B. E. (2019). Comparison of maximum likelihood, support vector machines, and random forest techniques in satellite images classification. *Tecnura*, 23(59), 13-26. <https://doi.org/10.14483/22487638.14826>
- Williams-Linera, G., Manson, R. H., & Isunza-Vera, E. (2016). La fragmentación del bosque mesófilo de montaña y patrones de uso del suelo en la región oeste de Xalapa, Veracruz, México. *Madera y Bosques*, 8(1), 73-89. <https://doi.org/10.21829/myb.2002.811307>