



**UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO**



**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**

**MODELACIÓN DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN LA CUENCA BAJA  
DEL RÍO USUMACINTA, MÉXICO**

**TESIS**

**PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN CIENCIAS EN ECOLOGÍA Y MANEJO DE  
SISTEMAS TROPICALES**

**PRESENTA:**

**M EN C. HÉCTOR JAVIER MEGIA VERA**

**BAJO LA DIRECCIÓN DE:**

**DR. MIGUEL ÁNGEL PALOMEQUE DE LA CRUZ**

**EN CODIRECCIÓN:**

**DR. RODIMIRO RAMOS REYES**

**VILLAHERMOSA, TABASCO, 4 DE DICIEMBRE DEL 2025**



**UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO**



**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**

**MODELACIÓN DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO  
USUMACINTA, MÉXICO**

**TESIS**

**PARA OBTENER EL GRADO DE**

**DOCTOR EN CIENCIAS EN ECOLOGÍA Y MANEJO DE SISTEMAS TROPICALES**

**PRESENTA:**

**M EN C. HÉCTOR JAVIER MEGIA VERA**

**BAJO LA DIRECCIÓN DE:**

**DR. MIGUEL ÁNGEL PALOMEQUE DE LA CRUZ**

**EN CODIRECCIÓN:**

**DR. RODIMIRO RAMOS REYES**

**VILLAHERMOSA, TABASCO, 4 DE DICIEMBRE DEL 2025**

## Declaración de Autoría y Originalidad

En la Ciudad de Villahermosa, Tabasco, el día 30 del mes junio del año 2025, el que suscribe **Héctor Javier Megia Vera** alumno del Programa de **Doctorado en Ciencias en Ecología y Manejo de Sistemas Tropicales** con número de matrícula **212G26003**, adscrito a la División Académica de Ciencias Biológicas, de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autor de la Tesis presentada para la obtención de grado de Doctor en Ciencias en Ecología y Manejo de Sistemas Tropicales y titulada **Modelación del cambio de uso del suelo en la cuenca baja del Río Usumacinta, México** dirigida por **Dr. Miguel Ángel de la Cruz Palomeque** y **Dr. Rodimiro Ramos Reyes**.

### DECLARO QUE:

La Tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la LEY FEDERAL DEL DERECHO DE AUTOR (Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley Federal del Derecho de Autor del 01 de Julio de 2020 regularizando y aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita. Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad o contenido de la Tesis presentada de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente.

Villahermosa, Tabasco a 10 de noviembre del 2025.

  
Héctor Javier Megia Vera



**UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS  
DIRECCIÓN**



NOVIEMBRE 20 DE 2025

**C. HÉCTOR JAVIER MEGÍA VERA  
PAS. DEL DOCTORADO EN CIENCIAS EN ECOLOGÍA Y  
MANEJO DE SISTEMAS TROPICALES  
P R E S E N T E**

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. Arts. 74 al 77 del Cap. IV del Reglamento General de Estudios de Posgrado de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se le autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Tesis de Doctorado en Ciencias en Ecología y Manejo de Sistemas Tropicales titulado: **"MODELACIÓN DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN LA CUENCA BAJA DEL USUMACINTA, MÉXICO"**, asesorado por el Dr. Lenin Arias Rodríguez, sobre el cual sustentará su Examen de Grado, cuyo jurado está integrado por el Dr. Adalberto Galindo Alcántara, Dr. Arturo Garrido Mora, Dr. Miguel Ángel Palomeque de la Cruz, Dr. Rodimiro Ramos Reyes, Dr. Rufo Sánchez Hernández, Dra. Tania Gudelia Núñez Magaña y Dr. José Luis Martínez Sánchez.

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE  
ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE

**DR. ARTURO GARRIDO MORA  
DIRECTOR**

UJAT  
DIVISIÓN ACADÉMICA  
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



C.c.p.- Expediente del Alumno.  
C.c.p.- Archivo



UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO

“ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE”



DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS  
DIRECCIÓN

Villahermosa, Tabasco a 19 de noviembre de 2025

**C. HÉCTOR JAVIER MEGÍA VERA**

EGRESADO DE DOCTORADO EN CIENCIAS EN ECOLOGÍA  
Y MANEJO DE SISTEMAS TROPICALES  
PRESENTE

En cumplimiento de los lineamientos de la Universidad, y por instrucciones de la Dirección de Posgrado, se implementó la revisión de los trabajos recepcionales (tesis), a través de la plataforma Turnitin iThenticate para evitar el plagio e incrementar la calidad en los procesos académicos y de investigación en esta División Académica. Esta revisión se realizó en correspondencia con el Código de Ética de la Universidad, el Reglamento General de Estudios de Posgrado, el Código Institucional de Ética para la Investigación y con los requerimientos para los posgrados registrados en el SNP de la SECIHTI.

Por este conducto, hago de su conocimiento que, con el objetivo de fortalecer y enriquecer el programa de posgrado, se realizó la revisión del documento en la plataforma iThenticate, obteniendo el reporte de similitud, el índice de similitud y se emitieron las siguientes sugerencias y recomendaciones para dar seguimiento en el documento de tesis del proyecto de investigación: ***Modelación del cambio de uso del suelo en la cuenca baja del Río Usumacinta, México.***

OBSERVACIONES:

1. **El índice de similitud obtenido fue de 10%**, el cual se ubica dentro del estándar de tolerancia de acuerdo a las Políticas y Lineamientos para el uso y manejo del Software Antiplagio de la UJAT. Se demuestra el nivel de originalidad del documento y de la investigación.
2. Aunque el reporte de similitud obtenido indica coincidencias con tres fuentes de consulta, éstas se refieren a párrafos en los capítulos correspondientes a los artículos publicados y enviados por el sustentante en revistas científicas. Lo anterior, no demerita el documento de tesis, pues dichas coincidencias corresponden con publicaciones de autoría del sustentante y de sus directores de tesis. Por lo que se confirma la originalidad de la investigación.





UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS  
DIRECCIÓN

3. **Se adjunta el reporte de similitud de la tesis** obtenido a través de la herramienta Turnitin iThenticate.
4. Finalmente, se le solicita al C. Héctor Javier Megía Vera, integrar en la versión final de tesis, este oficio y el reporte de similitud con el porcentaje emitido por Turnitin iThenticate de acuerdo con lo señalado en los Lineamientos institucionales para la elaboración de tesis de posgrado.

Sin otro particular al cual referirme, aprovecho la oportunidad para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE  
"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"

DR. ARTURO GARRIDO MORA  
DIRECTOR

UJAT  
DIVISIÓN ACADÉMICA  
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



DIRECCIÓN

C.C.P. Dr. Miguel Ángel Palomeque De la Cruz. Director de tesis  
Dr. Rodimiro Ramos Reyes. Codirector de tesis.  
Archivo

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

# Hector Javier Megia Vera

## Modelación del cambio de uso del suelo en la cuenca baja del Río Usumacinta, México

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

### Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:527017213

Fecha de entrega

12 nov 2025, 1:44 p.m. GMT-6

Fecha de descarga

19 nov 2025, 8:21 a.m. GMT-6

Nombre del archivo

Tesis\_Hector-J-Megia-V.pdf

Tamaño del archivo

2.6 MB

79 páginas

24.397 palabras

141.619 caracteres

# 10% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...


## Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 16 palabras)

## Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

## Fuentes principales

- 10%  Fuentes de Internet
- 10%  Publicaciones
- 1%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

## Marcas de integridad

### N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Texto oculto**  
362 caracteres sospechosos en N.º de página  
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

### Fuentes principales

- 10%  Fuentes de Internet
- 10%  Publicaciones
- 1%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

### Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	Internet	
	<a href="http://www.terralatinoamericana.org.mx">www.terralatinoamericana.org.mx</a>	10%
2	Trabajos entregados	
	Universidad Juárez Autónoma de Tabasco on 2025-10-10	<1%
3	Internet	
	<a href="http://cienciasagricolas.inifap.gob.mx">cienciasagricolas.inifap.gob.mx</a>	<1%

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco  
México

## Carta de Cesión de Derechos

Villahermosa, Tabasco, Noviembre 2025.

Por medio de la presente manifestamos haber colaborado como AUTOR en la producción, creación y realización de la obra denominada **Modelación del cambio de uso del suelo en la cuenca baja del Río Usumacinta, México**

Con fundamento en el artículo 83 de la Ley Federal del Derecho de Autor y toda vez que, la creación y/o realización de la obra antes mencionada se realizó bajo la comisión de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; entendemos y aceptamos el alcance del artículo en mención, de que tenemos el derecho al reconocimiento como autores de la obra, y la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco mantendrá en un 100% la titularidad de los derechos patrimoniales por un periodo de 20 años sobre la obra en la que colaboramos, por lo anterior, cedemos el derecho patrimonial exclusivo en favor de la Universidad.

### COLABORADORES

  
Héctor Javier Megía Vera

ALUMNO

  
Dr. Miguel Palomeque de La Cruz

DIRECTOR

  
Dr. Rodimiro Ramos Reyes

CODIRECTOR

### TESTIGOS

  
Dr. Adalberto Galindo Alcantara

  
Dr. Arturo Garrido Mora

## Dedicatoria

A Dios, por darme la fortaleza en los momentos difíciles, la claridad para continuar cuando el camino parecía incierto y la oportunidad de llegar hasta aquí. Su guía y misericordia iluminaron cada etapa de este proceso, siempre poniendo a las personas indicadas.

A mi familia, cuyo amor, paciencia y fortaleza fueron el sostén que me acompañó en cada paso de este camino.

A mi esposa, por su comprensión inagotable, su apoyo firme y su presencia en los momentos más desafiantes. Gracias por caminar a mi lado, por creer en mí incluso en los días difíciles y por ser un pilar fundamental en la construcción de este logro.

A mis niños, **Zabdi y Héctor**, quienes representan mi mayor motivación y el recordatorio constante de que los sueños se alcanzan con disciplina, perseverancia y esperanza. Cada avance en este proceso lleva consigo su sonrisa, su amor y la inspiración que me brindan cada día.

A quienes me abrieron sus brazos y corazón en tiempos difíciles, ofreciéndome refugio, afecto y la oportunidad de seguir adelante. Sin su apoyo solidario y desinteresado, este camino académico no habría sido posible. Su gesto generoso cambió mi vida y permanece grabado en mi corazón con profundo agradecimiento.

A quien ya no está físicamente, pero cuyo legado de esfuerzo, trabajo y dignidad continúa iluminando mi vida y guiando mis decisiones. Su ejemplo vive en este logro, muchas gracias mamá.

## Agradecimientos

En primer lugar, expreso mi más sincero agradecimiento al **Consejo Nacional de Ciencia, Humanidades y Tecnología (CONAHCYT)** por el apoyo otorgado mediante la **beca número 293867** para estudios de posgrado durante mi formación doctoral. El financiamiento proporcionado fue fundamental para la realización y culminación de esta investigación. Reconozco, además, la invaluable labor del CONAHCYT en el fortalecimiento de la ciencia, la innovación y la formación de recursos humanos de alto nivel, contribuyendo de manera significativa al desarrollo académico y científico de nuestro país.

Extiendo mi gratitud a la **Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT)** y, de manera especial, a la **División de Ciencias Biológicas**, por abrirme las puertas y permitirme formar parte del **Programa de Doctorado en Ciencias en Ecología y Manejo de Sistemas Tropicales**. Su compromiso institucional con la investigación científica, la calidad académica y el fortalecimiento de las capacidades profesionales fue determinante para consolidar esta etapa de mi formación doctoral.

Mi gratitud se extiende al **Tecnológico Nacional de México (TecNM) Campus Villa La Venta** por permitirme acceder al programa de superación profesional que garantizó la continuidad de mi desarrollo académico y la estabilidad laboral necesaria para concluir este proceso formativo.

Manifiesto también mi profunda gratitud a mi **comité académico**, por su acompañamiento constante, sus observaciones oportunas y su apoyo a lo largo de este proyecto. Su guía, rigor científico y confianza en mis capacidades fueron determinantes para fortalecer mi formación intelectual y profesional.

Finalmente, extiendo mi agradecimiento a todas las personas que, de una u otra forma, brindaron su apoyo, compartieron su tiempo o depositaron su confianza en este proyecto. Cada gesto de aliento y colaboración contribuyó significativamente a la consolidación de esta tesis.

¡¡Gracias!!

---

## Índice de contenido

CAPÍTULO I.....	11
PROTOCOLO DE TESIS.....	11
Resumen.....	12
Abstract .....	12
1. Introducción .....	14
2. Marco Teórico.....	14
2.1. Fundamentos conceptuales del cambio de uso del suelo .....	15
2.2. Enfoque de modelación del cambio de uso del suelo.....	15
2.3. Variables explicativas y patrones espaciales.....	16
2.4. Cambio de uso del suelo, servicios ecosistémicos y bienestar humano .....	16
2.5. Marco legal y político en México .....	16
3. Justificación.....	17
4. Antecedentes.....	18
5. Preguntas de investigación .....	19
6. Hipótesis .....	19
7. Objetivos.....	19
7.1. Objetivo general.....	19
7.2. Objetivos específicos .....	19
8. Metodología.....	20
8.1. Enfoque general del estudio .....	20
8.2. Diseño metodológico .....	20
8.3. Área de estudio .....	20
8.4. Fuentes de información.....	21
8.5. Preprocesamiento y clasificación.....	22
8.6. Análisis multitemporal del cambio de uso del suelo.....	22
8.7. Análisis espacial.....	22
8.8. Validación y presentación de resultados .....	22
9. Cronograma de actividades .....	23
10. Referencias bibliográficas.....	23
CAPITULO II.....	27
RESUMEN .....	29
INTRODUCCIÓN .....	30

MATERIALES Y MÉTODOS .....	31
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	36
CONCLUSIONES .....	41
LITERATURA CITADA .....	42
Introducción.....	52
Objetivo.....	53
Materiales y métodos.....	53
Resultados y discusión.....	57
Conclusiones.....	63
Referencias .....	65
Capítulo IV.....	72
4. Conclusiones .....	73
4.1. Implicaciones ecológicas y de manejo.....	74
4.2. Conclusiones generales.....	74
4.3. Consideraciones finales .....	75

## Índice de Tablas

### CAPÍTULO I

Tabla 1. Cronograma de actividades.....	23
---	----

### CAPÍTULO II

Tabla 1. Grupos de coberturas y uso de suelos considerados en la clasificación no supervisada.	34
Tabla 2. Tipos de coberturas y usos del suelo.....	36
Tabla 3. Distribución de CUS 2021 de la CBRU.....	40

### CAPÍTULO III

Tabla 1. Descripción de los usos del suelo y tipos de vegetación.....	55
Tabla 2. Usos del suelo en la Cuenca Baja del Usumacinta, México .....	60

---

## Índice de Figuras

### CAPÍTULO I

Figura 1. Cuenca baja del Usumacinta .....	21
--	----

### CAPÍTULO II

Figura 1. Ubicación espacial del área de estudio.....	32
Figura 2. Diagrama de flujo del análisis de coberturas y usos del suelo de la CBRU.....	33
Figura 3. Distribución de las clases de cobertura de suelo, mediante la clasificación no supervisada en la CBRU 2021.....	37
Figura 4. Distribución de las clases de cobertura de suelo a partir de la Clasificación supervisada en la CBRU 2021.....	39
Figura 5. Representación de coberturas y usos de la CBRU 2021: a) Humedales, b) Palma de Aceite, c) Agropecuario, d) Plantaciones forestales, f) Bosque tropical e) cuerpos de agua.....	40

### CAPITULO III

Figura 1. Cuenca del Río Usumacinta en el Sureste de México.....	54
Figura 2. Mapa de usos del suelo y vegetación 2000 y 2021 .....	56
Figura 3. Principales transiciones entre 2000 y 2021 .....	62

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

CAPÍTULO I  
PROTOCOLO DE TESIS

**Modelación del cambio de uso del suelo en la cuenca baja del Rio Usumacinta, México**

## Resumen

El presente capítulo examina el cambio de uso y cobertura del suelo (CUS) en la cuenca baja del río Usumacinta, Tabasco–Campeche, México, una región de alta relevancia ecológica, hidrológica y biocultural del sureste mexicano. A partir de la integración de técnicas de percepción remota, sistemas de información geográfica (SIG) y modelación predictiva mediante el módulo *Land Change Modeler* (TerrSet 2020), se analiza la evolución del uso del suelo entre los años 2000 y 2021 bajo dos supuestos: tendencial y conservacionista. El estudio adopta un enfoque cuantitativo, explicativo y multiescalar, incorporando variables biofísicas, con el objetivo de identificar los principales factores que impulsan la deforestación y la fragmentación del paisaje. Los resultados esperados permitirán delimitar áreas críticas de pérdida de cobertura vegetal, evaluar la correspondencia entre la transformación territorial y las zonas de conservación, y aportar evidencia científica para la toma de decisiones en materia de ordenamiento ecológico, restauración y manejo sostenible de los recursos naturales. Esta investigación busca fortalecer la comprensión de los procesos socioecológicos que modelan el territorio y ofrecer un marco técnico-metodológico aplicable a la gestión ambiental en cuencas tropicales de alta vulnerabilidad.

**Palabras clave:** cambio de uso del suelo, modelación espacial, cuenca baja del Usumacinta, SIG, deforestación, gestión ambiental.

## Abstract

This chapter examines land use and land cover change (LUCC) in the lower Usumacinta River basin, Tabasco–Campeche, Mexico, a region of high ecological, hydrological, and biocultural importance in southeastern Mexico. Using a combination of remote sensing techniques, geographic information systems (GIS), and predictive modeling with the Land Change Modeler module (TerrSet 2020), we analyze the evolution of land use between 2000 and 2021 under two assumptions: trend-based and conservationist. The study adopts a quantitative, explanatory, and multiscale approach, incorporating biophysical variables, with the aim of identifying the main factors driving deforestation and landscape fragmentation. The expected results will make it possible to delimit critical areas of vegetation cover loss, evaluate the correspondence between territorial transformation and conservation areas, and provide scientific evidence for decision-making in ecological planning, restoration, and sustainable management of natural resources. This

research seeks to strengthen understanding of the socio-ecological processes that shape the territory and to offer a technical-methodological framework applicable to environmental management in highly vulnerable tropical watersheds.

**Keywords:** land use change, spatial modeling, Lower Usumacinta Basin, GIS, deforestation, environmental management.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México

## 1. Introducción

El cambio de uso del suelo (CUS) constituye un parámetro clave en el estudio de la dinámica del paisaje, ya que implica no solo la sustitución de coberturas vegetales por usos antropogénicos, sino también modificaciones profundas en los procesos ecológicos, hidrológicos y de servicios ecosistémicos (Song et al., 2022). Estudios globales han documentado que gran parte de la deforestación ocurre en regiones tropicales y que estos procesos son impulsados por la interacción de factores como población, infraestructura, expansión urbana, mercado agropecuario y políticas de uso del suelo (Hansen et al., 2020; Prieto-Amparán et al., 2019).

La cuenca baja del río Usumacinta, enclave ecológico del sureste mexicano, alberga selvas altas perennifolias, humedales, manglares y sistemas ribereños que funcionan como corredores biológicos y como almacenamiento de carbono. No obstante, este territorio enfrenta presiones de transformación que afectan su integridad ecológica. Por ejemplo, la fragmentación del bosque reduce la conectividad, incrementa la vulnerabilidad frente a inundaciones y altera los ciclos hidrológicos de la cuenca.

La aplicación de técnicas de percepción remota y SIG combinadas con modelos de cambio de uso del suelo se ha consolidado como una vía metodológica robusta para identificar tendencias, analizar causas (Chang-Martínez et al., 2015; Verburg et al., 2011). En particular, los modelos de simulación espacial (autómatas celulares, modelos Markov, ambientes híbridos) ofrecen herramientas para explorar cómo las variables socioeconómicas y biofísicas generan patrones de conversión espacial (Mazo et al., 2022; Mazy & Longaretti, 2022).

Por lo tanto, esta investigación se propone analizar la dinámica histórica (2000-2021) del cambio de uso del suelo en la cuenca baja del Usumacinta, mediante modelación espacial. Con ello se pretende aportar evidencias científicas aplicadas al manejo ambiental, la conservación y el ordenamiento territorial, especialmente en el contexto de políticas regionales y nacionales de sostenibilidad.

## 2. Marco Teórico

El cambio de uso del suelo (CUS) es un fenómeno complejo que refleja las interacciones entre factores biofísicos, socioeconómicos y políticos que transforman el paisaje y modifican las funciones ecológicas de los ecosistemas (Lambin & Geist, 2006). En términos ecológicos, el CUS implica la sustitución de coberturas vegetales naturales por usos agropecuarios, urbanos o

industriales, alterando procesos esenciales como el ciclo hidrológico, la regulación climática y la provisión de servicios ecosistémicos (Song et al., 2022). Estas transformaciones tienen implicaciones directas sobre la biodiversidad, la disponibilidad de recursos naturales y la resiliencia de los sistemas socioecológicos (Foley et al., 2005).

### **2.1. Fundamentos conceptuales del cambio de uso del suelo**

De acuerdo con Turner et al. (2007), el estudio del CUS se basa en comprender las causas y consecuencias de las transformaciones territoriales a partir de tres dimensiones: las fuerzas motrices (drivers), los procesos de conversión y las respuestas sociales e institucionales. Estas fuerzas motrices incluyen tanto factores directos —como la expansión agrícola, el crecimiento urbano y la infraestructura— como factores indirectos, entre ellos las políticas económicas, la presión demográfica y los cambios tecnológicos (Geist & Lambin, 2002).

En el contexto de América Latina, el CUS ha sido impulsado principalmente por la agricultura extensiva, la ganadería y la apertura de nuevas vías de comunicación (Calzada et al., 2018; Cruz et al., 2023). En el sureste de México, la conversión de selvas a pastizales y cultivos se asocia con dinámicas socioeconómicas locales y regionales, lo que plantea la necesidad de integrar información ambiental, social y política en la modelación del territorio (Peralta-Carreta et al., 2019).

### **2.2. Enfoque de modelación del cambio de uso del suelo**

La modelación del CUS constituye una herramienta clave para comprender la dinámica espacial y temporal de las transformaciones territoriales. Según Verburg et al. (2011), los modelos de cambio de uso del suelo se clasifican en tres enfoques principales: (a) modelos estadísticos, que relacionan cambios observados con variables explicativas; (b) modelos basados en procesos, que simulan la dinámica mediante reglas de transición espacial (como los autómatas celulares); y (c) modelos híbridos, que integran ambos enfoques.

Entre los modelos más utilizados se encuentra Land Change Modeler (LCM), que emplea matrices de transición, análisis de potenciales de cambio y simulación predictiva con base en algoritmos de aprendizaje espacial (Eastman, 2020). Este tipo de modelación permite cuantificar la probabilidad de conversión entre coberturas, evaluar la influencia de variables socioambientales y proyectar escenarios de futuro bajo distintos supuestos de manejo (Mazo et al., 2022). Además,

modelos recientes como PLUS y FLUS integran redes neuronales y algoritmos adaptativos que mejoran la precisión de las simulaciones a escalas regionales (Zhou et al., 2025).

### **2.3. Variables explicativas y patrones espaciales**

La modelación del CUS requiere seleccionar variables biofísicas (pendiente, altitud, precipitación, temperatura, distancia a ríos) y socioeconómicas (densidad poblacional, distancia a carreteras, uso actual del suelo), que explican la probabilidad de conversión entre clases de cobertura (Prieto-Amparán et al., 2019). Estas variables permiten identificar patrones espaciales y determinar zonas críticas de deforestación o expansión agropecuaria (Hansen et al., 2013). En la cuenca baja del Usumacinta, tales patrones reflejan la interacción entre la presión humana, la infraestructura vial y la capacidad de los ecosistemas para resistir la transformación.

### **2.4. Cambio de uso del suelo, servicios ecosistémicos y bienestar humano**

El vínculo entre el CUS y los servicios ecosistémicos es una de las líneas más recientes en la investigación ambiental. La pérdida de cobertura vegetal reduce la capacidad de los ecosistemas para ofrecer servicios de regulación (clima, agua, erosión), aprovisionamiento (alimentos, madera) y culturales (paisaje, identidad) (Martín-López et al., 2021). Cuando estos servicios disminuyen, se afectan dimensiones del bienestar humano como la salud, la seguridad alimentaria y la estabilidad económica (Giljum et al., 2021). En este sentido, el modelado del CUS permite proyectar impactos potenciales y orientar políticas de restauración y conservación.

### **2.5. Marco legal y político en México**

En México, la gestión del territorio se sustenta en instrumentos como los Programas de Ordenamiento Ecológico del Territorio (POET) y la Estrategia Nacional de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático 2022–2030, los cuales buscan equilibrar las actividades productivas con la conservación de los recursos naturales (INECC, 2022). Asimismo, la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2022) reporta que la deforestación y el cambio de uso del suelo son los principales factores de pérdida de biodiversidad, lo que hace indispensable contar con información geoespacial actualizada para la toma de decisiones.

En el caso de la cuenca baja del Usumacinta, la aplicación de modelos predictivos contribuye a fortalecer los instrumentos de gestión territorial, generando evidencia científica para

el diseño de estrategias de conservación y restauración ecológica en un contexto de alta vulnerabilidad ambiental.

### 3. Justificación

El valor ecológico, social e institucional de la cuenca baja del Usumacinta demanda un análisis riguroso del CUS, por varias razones:

Esta cuenca integra ecosistemas de gran biodiversidad y alto endemismo (selva, humedales, riberas). La conversión de estos ecosistemas reduce su capacidad de provisión de servicios, tales como: la regulación hídrica, captura de carbono, refugio para fauna y protección frente a eventos extremos (De Alba-Rosano & Cervantes-Vázquez, 2020). Por ejemplo, al considerar que la deforestación contribuye de manera importante a las emisiones de carbono y al deterioro de los suelos, su cuantificación y modelado resultan esenciales para mecanismos de mitigación (Gusti & Kindermann, 2011).

Las comunidades locales dependen de recursos forestales, agua, pesca y agricultura asociada al uso del suelo. Cambios en la cobertura pueden afectar la disponibilidad de recursos, incrementar vulnerabilidad ante inundaciones o sequías, y generar conflictos por uso del territorio. Estudios que vinculan el cambio de uso del suelo con bienestar humano muestran que la reducción de ecosistemas naturales tiene efectos negativos en salud, seguridad alimentaria y calidad de vida (Giljum et al., 2021).

El contexto mexicano exige gestionar el uso del suelo con base en instrumentos de planificación (planes de ordenamiento ecológico, normativas), con datos actualizados y métodos predictivos. Revisiones de modelos de CUS señalan que los avances metodológicos (multi-escala, integrada socio-biofísica) deben aplicarse al terreno para guiar políticas locales (Verburg et al., 2011; Mazy & Longaretti, 2022). La presente investigación atiende esa brecha metodológica en la región sureste de México.

La modelación avanzada del CUS permite no solo describir cambios pasados, sino también proyectar escenarios futuros, asignar probabilidades de transición espacial y estimar impactos de diferentes políticas o supuestos. Reviews recientes muestran un aumento marcado en publicaciones de simulación de LULC (land use/land cover) entre 2016-2023, con énfasis en escenarios múltiples, cambio climático y servicios ecosistémicos (Zhou et al., 2025). Esto indica

la vigencia del tema y la oportunidad para aportar nuevos casos de estudio regionales con metodología actualizada.

Por lo anterior, investigar la cuenca baja del Usumacinta desde esta perspectiva no solo es pertinente, sino urgente, para articular ciencia, gestión y políticas en una región clave para la biodiversidad y el desarrollo sustentable de México.

#### **4. Antecedentes**

El estudio de las CUS ha evolucionado considerablemente. Por ejemplo, Agarwal et al. (2002) presentaron una revisión sobre modelos de cambio de uso del suelo, proponiendo un marco para comparar los modelos en términos de escala espacial/temporal y decisión humana. Verburg et al. (2011) revisaron las prácticas actuales en modelación de CUS y señalaron seis conceptos clave para el diseño del modelo (nivel de análisis, dinámica cruzada de escalas, fuerzas motrices, interacción espacial, dinámica temporal, nivel de integración).

Recientemente, Zhou et al. (2025) realizaron un análisis de más de 2 000 artículos publicados entre 1988-2023 en simulación de LULC, identificando nuevas tendencias como “multi-scenario simulation”, “carbon storage”, “ecosystem services” y la integración de modelos CA-Markov, FLUS y PLUS. Estas revisiones establecen que los modelos de CUS deben responder a la complejidad socioecológica, integrar datos espaciales de alta resolución, incluir efectos de vecindad y escalas múltiples, y generar escenarios útiles para la política.

En México, Calzada et al. (2018) analizaron el cambio de uso/cobertura en ecosistemas secos tropicales contrastantes, evidenciando que la agricultura inducida a pastizales y asentamientos humanos fueron las conversiones dominantes. En un caso más metodológico, Prieto-Amparán et al. (2019) modelaron LULC en una región forestal de Chihuahua (1990-2017), generando escenarios al 2050 mediante Dinamica-EGO.

Para la cuenca del Usumacinta, varios trabajos documentan la deforestación. Por ejemplo, Gallardo-Cruz et al. (2021) analizaron la pérdida de cobertura forestal (2000-2018) en áreas protegidas y no protegidas de la cuenca, mostrando que la deforestación fuera de las ANP es mayor. Asimismo, Peralta-Carreta et al. (2019) calcularon que se perdieron más de 347 000 ha de

cobertura arbórea entre 2000-2016 en la cuenca, concentradas en selvas altas perennifolias y vegetación secundaria existentes.

Aunque estos estudios describen las pérdidas y tendencias, se observa una brecha en la modelación predictiva espacial para la cuenca baja del Usumacinta con proyección para los años 2000 y 2021.

## 5. Preguntas de investigación

1. ¿Cuáles han sido los principales patrones espaciales y temporales del cambio de uso y cobertura del suelo en la cuenca baja del río Usumacinta durante el periodo 2000–2021?
2. ¿Qué factores antrópicos y ambientales explican la dinámica del cambio de uso del suelo y la pérdida de cobertura vegetal en la región de estudio?
3. ¿Cuáles son las zonas críticas de deforestación y fragmentación del paisaje que requieren priorización en estrategias de conservación y restauración ecológica?

## 6. Hipótesis

La dinámica del cambio de uso del suelo en la cuenca baja del río Usumacinta está determinada por la expansión agropecuaria y urbana, y su modelación mediante técnicas geomáticas predictivas permite identificar zonas críticas de deforestación que orienten estrategias efectivas de conservación y restauración ecológica.

## 7. Objetivos

### 7.1. Objetivo general

Modelar la dinámica espacial del cambio de uso y cobertura del suelo en la cuenca baja del río Usumacinta durante el periodo 2000–2021 mediante el uso de herramientas de percepción remota, SIG.

### 7.2. Objetivos específicos

1. Analizar los cambios históricos de uso y cobertura del suelo durante los años 2000 y 2021 a partir de imágenes **Landsat**, integradas en plataformas SIG.

2. Determinar los principales factores antrópicos y ambientales asociados a los procesos de deforestación y fragmentación en la cuenca baja del Usumacinta.
3. Evaluar la distribución espacial de las áreas críticas de pérdida de cobertura vegetal y su correspondencia con las zonas de conservación y uso intensivo.

## **8. Metodología**

### **8.1. Enfoque general del estudio**

La presente investigación adopta un enfoque cuantitativo y explicativo, sustentado en el análisis espacial multitemporal del cambio de uso y cobertura del suelo mediante tecnologías geomáticas (percepción remota, SIG ). Según Eastman (2020), los modelos espaciales permiten “representar de manera explícita la dinámica territorial a partir de datos raster y vectores integrados en entornos SIG” (p. 45). Este enfoque busca establecer relaciones causales entre los factores antrópicos y biofísicos que impulsan la deforestación y simular escenarios futuros bajo distintos supuestos de manejo del territorio.

### **8.2. Diseño metodológico**

El diseño metodológico es de tipo no experimental, longitudinal y correlacional, ya que analiza la evolución del cambio de uso del suelo durante dos periodos (2000 y 2021). De acuerdo con Hernández-Sampieri et al. (2022), este tipo de diseño “permite observar fenómenos a través del tiempo, sin manipular variables, con el fin de describir tendencias o establecer asociaciones causales” (p. 157).

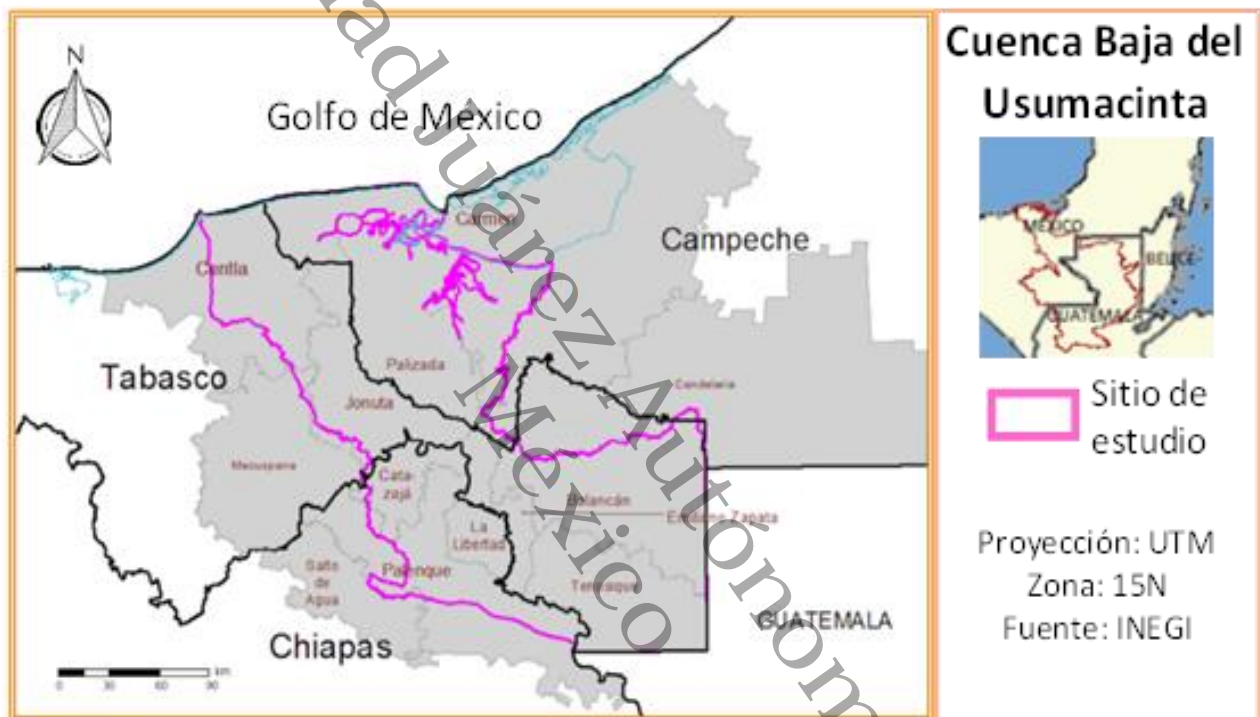
El proceso se estructura en tres fases integradas:

1. Adquisición y preprocesamiento de información geoespacial.
2. Clasificación y análisis multitemporal del uso del suelo.
3. Identificación de variables explicativas del cambio.

### **8.3. Área de estudio**

El sitio de estudio se localiza en los municipios de Balancán, Centla, Emiliano Zapata, Jonuta y Tenosique, ocupa el 51% del territorio tabasqueño (INAFED 2010, Gallardo Cruz et al., 2019). ubica entre los 15° 15' 32.8" y 18° 38' 54" LW y 90° 22' 27" y 94° 14' 04" LO, con una

extensión territorial de 87, 143.898 km<sup>2</sup> (Sánchez et al., 2013) (Figura 1) Cuenta con tres áreas destinadas a la conservación de la biodiversidad; Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla, el Área de Protección de Flora y Fauna Cañón del Usumacinta y el Área Natural Protegida estatal de Cascadas de Reforma, Los usos de suelo que predominan son los pastizales cultivados y agricultura temporal, los ecosistemas naturales que persisten son: bosque tropical perennifolio, humedales herbáceos, bosque tropical sub-perennifolio y bosque de mangle (SIMEC y CONANP 2019).



**Figura 1.** Cuenca baja del Usumacinta

El presente estudio consta de tres fases, la primera de gabinete que consiste en la recopilación de información, construcción y tratamiento de base de datos a partir de software especializados como TerrSet®, Qgis® 3.14, entre otros, seguido de la validación en campo y consulta de opinión a los especialistas en el tema de estudio, finalmente el análisis e interpretación de datos.

#### 8.4. Fuentes de información

Se emplearán **imágenes satelitales Landsat 5 TM, Landsat 8 OLI**, obtenidas del portal Google Earth Engine (GEE). Estas fuentes son reconocidas por su resolución espacial y disponibilidad

temporal. Hansen et al. (2013) señalan que las series Landsat “han permitido construir los primeros mapas globales de deforestación de alta resolución” (p. 850). Asimismo, se integrarán datos del INEGI (Serie VI de uso de suelo y vegetación), capas vectoriales de carreteras, hidrografía, límites administrativos y densidad poblacional.

### **8.5. Preprocesamiento y clasificación**

Las imágenes serán corregidas atmosférica y radiométricamente utilizando el algoritmo LEDAPS para Landsat. Posteriormente, se aplicará una **clasificación supervisada** mediante el algoritmo ISODATA. Este método ha mostrado alta precisión en la discriminación de coberturas tropicales. Según Belgiu y Drăguț (2016). La validación se realizará mediante matrices de confusión y el índice Kappa, con un mínimo aceptable de 0.85 (Congalton & Green, 2019).

### **8.6. Análisis multitemporal del cambio de uso del suelo**

El análisis multitemporal comparará las coberturas para los años 2000 y 2021 mediante el método de **post-clasificación cruzada**, que permite cuantificar las transiciones entre clases. Song et al. (2022) destacan que este enfoque “proporciona la base para detectar tasas de cambio, patrones espaciales y dinámicas ecológicas a escala regional” (p. 941). Los mapas resultantes se procesarán en el software TerrSet 2020.

### **8.7. Análisis espacial**

Los escenarios generados se integrarán en un sistema de información geográfica (Qgis® 3.14) para identificar **zonas críticas de deforestación, fragmentación y restauración prioritaria**. Se calcularán indicadores de paisaje (número de parches, densidad de bordes y tamaño medio de fragmentos) mediante el software TerrSet®, Qgis® 3.14, Según McGarigal et al. (2012), “las métricas de paisaje son esenciales para cuantificar los efectos ecológicos del cambio de uso del suelo sobre la conectividad y la integridad del hábitat” (p. 12).

### **8.8. Validación y presentación de resultados**

Los resultados se presentarán en mapas temáticos, gráficas de transición y reportes de precisión. De acuerdo con Verburg et al. (2011), “la validación de modelos espaciales debe basarse tanto en medidas estadísticas de exactitud como en la interpretación ecológica de los patrones simulados” (p. 312).

### 9. Cronograma de actividades

**Tabla 1.** Cronograma de actividades

Año	2021			2022												2023												2024												2025								
Mes	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8
Revisión de literatura	█																																															
Redacción protocolo de tesis	█																																															
Cursos académicos	█																																															
Presentación de la versión final del protocolo	█																																															
Construcción de base de datos geográficos	█																																															
Geoprosamiento de datos	█																																															
Verificación en campo	█																																															
Validación del modelo 2021	█																																															
Construcción de mapa de usos de suelo 2000	█																																															
Validación del modelo 2000	█																																															
Estancia académica	█																																															
Retribución social	█																																															
Redacción del manuscrito I	█																																															
Liberación de inglés	█																																															
Redacción de la tesis	█																																															
Redacción de manuscritos II	█																																															
Envío de manuscritos	█																																															

### 10. Referencias bibliográficas

Agarwal, C., Green, G. M., Grove, J. M., Evans, T. P., & Schweik, C. M. (2002). *A review and assessment of land-use change models: Dynamics of space, time, and human choice*. USDA Forest Service, General Technical Report NE-297. <https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/16512>

Belgiu, M., & Drăguț, L. (2016). Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 114, 24–31. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011>

Calzada, A., Pérez-Miranda, R. C., & Bravo, L. C. (2018). Land use and cover change in tropical dry ecosystems of Mexico. *Applied Geography*, 95, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.04.007>

Chang-Martínez, L. A., Mas, J. F., Valle, N. T., Torres, P. S. U., & Folan, W. J. (2015). Modeling historical land cover and land use: A review from contemporary modeling. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(4), 1791–1812. <https://doi.org/10.3390/ijgi4041791>

- CONABIO. (2022). *Informe de la cobertura forestal y deforestación en México 2015–2020*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. <https://www.biodiversidad.gob.mx/>
- Congalton, R. G., & Green, K. (2019). *Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices* (3rd ed.). CRC Press.
- Cruz, R., Ramos-Reyes, R., & Gama-Campillo, L. (2023). Tendencias recientes de deforestación y restauración en el sureste de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 94(2), e943. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2023.94.943>
- De Alba-Rosano, C. C., & Cervantes-Vázquez, J. (2020). Revisión sistemática de cuarenta años de análisis del cambio de uso del suelo en México mediante SIG. *Geografía Espacios*, 10(20), 139–162. <https://doi.org/10.25074/07197209.20.1740>
- Eastman, J. R. (2020). *IDRISI TerrSet: Geospatial Monitoring and Modeling System*. Clark University.
- Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., et al. (2005). Global consequences of land use. *Science*, 309(5734), 570–574. <https://doi.org/10.1126/science.1111772>
- Gallardo-Cruz, J. A., Pérez-García, C. P., & Martínez, M. (2021). Deforestation and trends of change in protected areas of the Usumacinta River Basin (2000–2018). *Regional Environmental Change*, 21(7), 118–135. <https://doi.org/10.1007/s10113-021-01833-8>
- Geist, H. J., & Lambin, E. F. (2002). Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation. *BioScience*, 52(2), 143–150. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2002\)052\[0143:PCAUDF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0143:PCAUDF]2.0.CO;2)
- Giljum, S., Wieland, H., & Bruckner, M. (2021). Land use and human well-being: A global assessment. *Environmental Research Letters*, 16(4), 045002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abe9b3>
- Gusti, M., & Kindermann, G. (2011). An approach for quantifying the impact of changes in land-use patterns on terrestrial carbon stocks in the tropics. *Environmental Modelling & Software*, 26(11), 1515–1528. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.07.009>

- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., et al. (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, *342*(6160), 850–853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>
- Hernández-Sampieri, R., Mendoza, C., & Torres, C. (2022). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* (7ª ed.). McGraw-Hill.
- INECC. (2022). *Estrategia Nacional de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático 2022–2030*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/inecc>
- Lambin, E. F., & Geist, H. J. (2006). *Land-use and land-cover change: Local processes and global impacts*. Springer.
- Martín-López, B., Felipe-Lucia, M. R., Bennett, E. M., Norström, A. V., Peterson, G. D., et al. (2021). Projecting effects of land use change on human well-being through ecosystem services. *People and Nature*, *3*(2), 305–320. <https://doi.org/10.1002/pan3.10186>
- Mazo, P., González-Suárez, J., & Fandiño, L. (2022). Land-use change and landscape fragmentation in tropical forests using CA-Markov models. *Ecological Modelling*, *470*, 110006. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2022.110006>
- Mazy, J., & Longaretti, P.-Y. (2022). Spatial hybrid modelling for socio-ecological systems: Coupling agent-based and cellular automata approaches. *Environmental Modelling & Software*, *156*, 105461. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105461>
- McGarigal, K., Cushman, S. A., & Ene, E. (2012). *FRAGSTATS v4: Spatial pattern analysis program for categorical maps*. University of Massachusetts.
- Peralta-Carreta, J. A., Chávez-González, H., & Cruz, R. H. (2019). Clasificación del uso de suelo y vegetación en áreas de pérdida de cobertura arbórea (2000–2016) en la cuenca del río Usumacinta. *Madera y Bosques*, *25*(3), 177–190. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2531779>
- Pontius, R. G., & Malanson, J. (2005). Comparison of the structure and accuracy of two land change models. *International Journal of Geographical Information Science*, *19*(2), 243–265. <https://doi.org/10.1080/13658810410001713380>

- Prieto-Amparán, J. A., Treviño-Garza, E. J., & González-Tagle, M. A. (2019). Spatial near-future modeling of land use and land cover change scenarios for a forest region in northern Mexico. *Remote Sensing*, *11*(5), 643. <https://doi.org/10.3390/rs11050643>
- Song, X. P., Hansen, M. C., Potapov, P. V., et al. (2022). Global land change from 2000 to 2020. *Nature Reviews Earth & Environment*, *3*, 939–951. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00349-3>
- Turner, B. L., Lambin, E. F., & Reenberg, A. (2007). The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *104*(52), 20666–20671. <https://doi.org/10.1073/pnas.0704119104>
- Verburg, P. H., Schot, P., Dijst, M., & Veldkamp, A. (2011). Land-use change modelling: Current practice and research priorities. *GeoJournal*, *61*(4), 309–324. <https://doi.org/10.1023/B:GEJO.0000034736.59344.38>
- Zhou, Y., Liu, X., & Li, X. (2025). A bibliometric review of land use and land cover change simulation models (1988–2023). *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *9*, 1548565. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1548565>

**CAPITULO II**  
**EXPLORANDO LA CUENCA BAJA DEL RÍO USUMACINTA A TRAVÉS DE LA**  
**TELEDETECCIÓN: UNA CLASIFICACIÓN DE COBERTURA Y USO DEL SUELO**  
**EXPLORING THE USUMACINTA RIVER LOWER BASIN THROUGH REMOTE**  
**SENSING: A LAND COVER AND USE CLASSIFICATION**

**Nombre del artículo:** Explorando la cuenca baja del río Usumacinta a través de la teledetección: una clasificación de cobertura y uso del suelo

**Autores:** Héctor Javier Megia-Vera<sup>1,2</sup>, Candelario Peralta-Carreta<sup>1,3</sup> Ojilve Ramón Medrano-Pérez<sup>3,4</sup> Miguel Ángel Palomeque-De la Cruz<sup>1</sup> Rodimiro Ramos-Reyes<sup>5‡</sup>  
Adalberto Galindo Alcantara<sup>1</sup>

**Resumen:** El presente estudio tuvo como objetivo clasificar las coberturas y usos de suelo (CUS) en la Cuenca Baja del Río Usumacinta (CBRU) mediante el análisis de imágenes satelitales Landsat 8 OLI y una clasificación no supervisada (CNS) y supervisada (CS) utilizando para el estudio los algoritmos de clasificación ISODATA para la CNS y el de Máxima Verosimilitud (*MLC*) para la CS. La CNS (ISODATA) agrupó los píxeles basándose en la distancia espectral, identificando cuatro clases generales: humedales, uso de suelo, vegetación arbórea y cuerpos de agua, con una precisión moderada (índice Kappa de 0.61 a 0.75). Por su parte, la CS con el algoritmo de *MLC*, utilizó 948 puntos de entrenamiento y datos auxiliares derivados del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (*NDVI*) y el Modelo Digital de Elevación (*DEM*), proporcionó un mapeo más detallado discriminando clases específicas como agricultura (41%), humedales (21%), plantaciones forestales comerciales (4%) y áreas urbanas (1%), logrando una excelente precisión con un índice Kappa de 0.90, validado mediante 948 puntos de control terrestre. La integración de los datos *NDVI* y *DEM* mejoró la discriminación espectral de la cobertura del bosque tropical y humedal en la clasificación supervisada. Si bien la clasificación no supervisada representó aproximadamente el 67% de los grupos generales de CUS, careció de precisión para diferenciar clases específicas como bosques tropicales, bosques inundados y plantaciones de palma de aceite. Los resultados obtenidos resaltan la importancia de utilizar imágenes satelitales actualizadas, datos auxiliares y métodos de clasificación robustos para lograr un mapeo preciso de las CUS en la CBRU, lo cual puede apoyar la planificación territorial, el manejo de recursos naturales y los esfuerzos de conservación de la biodiversidad en esta región prioritaria.

**Palabras clave:** Clasificación supervisada 1, Clasificación no supervisada 2, DEM 3, NDVI 4.

**Institución de adscripción de cada autor:** <sup>1</sup>División Académica de Ciencias Biológicas. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), Carretera Villahermosa-Cárdenas km 0.5 s/n, entronque a Bosques de Saloya. 86150 Villahermosa, Tabasco, México; (MAPC), (HJMV), (CPC), (AGA).

<sup>2</sup> Tecnológico Nacional de México/instituto Tecnológico Superior de Villa La Venta (ITSLV), Huimanguillo Tabasco México; (HJMV).

<sup>3</sup> Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad, A.C. Villahermosa, Tabasco, México; (CPC).

<sup>4</sup> CONAHCyT-Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Misantla (ITSM), Misantla, Veracruz, México; (ORMP).

<sup>5</sup>El Colegio de la Frontera Sur Unidad Villahermosa. Carretera a Reforma km 15.5 s/n. Ra. Guineo 2da. Sección, Centro. 86280 Villahermosa, Tabasco, México; (RRR).

**Enviado a y/o publicado en:** Terra Latinoamericana

DOI: 0.28940/terra.v43i.2075

**Nombre de la Editorial:** Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A. C.

**Fecha de envío o Fecha de publicación:** abril de 2025

**Explorando la cuenca baja del río Usumacinta a través de la teledetección:  
una clasificación de cobertura y uso del suelo**  
**Exploring the Usumacinta River lower basin through remote sensing: a land  
cover and use classification**

**Héctor Javier Megía-Vera<sup>1,2</sup> (<https://orcid.org/0000-0001-6499-5404>), Candelario Peralta-Carreta<sup>1,3</sup> (<https://orcid.org/0000-0002-5747-9791>), Ojilve Ramón Medrano-Pérez<sup>3,4</sup> (<https://orcid.org/0000-0002-5445-1136>), Miguel Ángel Palomeque-De la Cruz<sup>1</sup> (<https://orcid.org/0000-0002-0407-8476>), Rodimiro Ramos-Reyes<sup>5,‡</sup> (<https://orcid.org/0000-0003-3957-8160>), Adalberto Galindo Alcantara<sup>1</sup> (<https://orcid.org/0000-0001-9628-982X>).**

<sup>1</sup> División Académica de Ciencias Biológicas. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), Carretera Villahermosa-Cárdenas km 0.5 s/n, entronque a Bosques de Saloya. 86150 Villahermosa, Tabasco, México; (MAPC), (HJMV), (CPC), (AGA).

<sup>2</sup> Tecnológico Nacional de México/instituto Tecnológico Superior de Villa La Venta (ITSLV), Huimanguillo Tabasco México; (HJMV).

<sup>3</sup> Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad, A.C. Villahermosa, Tabasco, México; (CPC).

<sup>4</sup> CONAHCyT-Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Misantla (ITSM), Misantla, Veracruz, México; (ORMP).

<sup>5</sup> El Colegio de la Frontera Sur Unidad Villahermosa. Carretera a Reforma km 15.5 s/n. Ra. Guineo 2da. Sección, Centro. 86280 Villahermosa, Tabasco, México; (RRR).

<sup>‡</sup> Autor para correspondencia: rramos@ecosur.mx

## RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo clasificar las coberturas y usos de suelo (CUS) en la Cuenca Baja del Río Usumacinta (CBRU) mediante el análisis de imágenes satelitales Landsat 8 OLI y una clasificación no supervisada (CNS) y supervisada (CS) utilizando para el estudio los algoritmos de clasificación ISODATA para la CNS y el de Máxima Verosimilitud (*MLC*) para la CS. La CNS (ISODATA) agrupó los píxeles basándose en la distancia espectral, identificando cuatro clases generales: humedales, uso de suelo, vegetación arbórea y cuerpos de agua, con una precisión moderada (índice Kappa de 0.61 a 0.75). Por su parte, la CS con el algoritmo de *MLC*, utilizó 948 puntos de entrenamiento y datos auxiliares derivados del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (*NDVI*) y el Modelo Digital de Elevación (*DEM*), proporcionó un mapeo más detallado discriminando clases específicas como agricultura (41%), humedales (21%), plantaciones forestales comerciales (4%) y áreas urbanas (1%), logrando una excelente precisión con un índice Kappa de 0.90, validado mediante 948 puntos de control terrestre. La integración de los datos *NDVI* y *DEM* mejoró la discriminación espectral de la cobertura del bosque tropical y humedal en la clasificación supervisada. Si bien la clasificación no supervisada representó aproximadamente el 67% de los grupos generales de CUS, careció de precisión para diferenciar clases específicas como bosques tropicales, bosques inundados y plantaciones de palma de aceite. Los resultados obtenidos resaltan la importancia de utilizar imágenes satelitales actualizadas, datos auxiliares y métodos de clasificación robustos para lograr un mapeo preciso de las CUS en la CBRU, lo cual puede apoyar la planificación territorial, el manejo de recursos naturales y los esfuerzos de conservación de la biodiversidad en esta región prioritaria.

**Palabras clave:** Clasificación supervisada 1, Clasificación no supervisada 2, DEM 3, NDVI 4.

## SUMMARY

The present study aimed to classify land cover and land use (LCLU) in the Lower Usumacinta River

Basin (LURB) through the analysis of Landsat 8 OLI satellite imagery and the application of the Maximum Likelihood (MLC) supervised and ISODATA unsupervised classification algorithms. The unsupervised ISODATA classification grouped pixels based on spectral distance, identifying four general classes: wetlands, land use, tree vegetation, and water bodies, with moderate accuracy (Kappa index of 0.61 to 0.75). On the other hand, the supervised MLC classification, using training samples and auxiliary data derived from the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the Digital Elevation Model (DEM), provided a more detailed mapping by discriminating specific classes such as agriculture (41%), wetlands (21%), commercial forest plantations (4%), and urban areas (1%), achieving excellent accuracy with a Kappa index of 0.90, validated through 948 ground control points. Integrating NDVI and DEM data improved the spectral discrimination of tropical forest and wetland covers in the supervised classification. Although the unsupervised classification represented approximately 50% of the general LCLU groups, it lacked the precision to differentiate specific classes such as tropical forests, flooded forests, and oil palm plantations. The results highlight the importance of using updated satellite imagery, auxiliary data, and robust classification methods to achieve accurate LCLU mapping in the LURB, which can support territorial planning, natural resource management, and biodiversity conservation efforts in this priority region.

**Index words:** *Supervised classification 1, Unsupervised classification 2, DEM 3, NDVI 4.*

## INTRODUCCIÓN

El uso del suelo es el resultado de las actividades socioeconómicas dirigidas a la apropiación del capital natural y la generación de bienes y servicios sobre una cobertura vegetal (Pineda-Pastrana, 2011). Sin embargo, estas actividades están modificando constantemente los patrones de Cobertura y Usos del Suelo (CUS) a diferentes escalas, siendo un importante impulsor del cambio climático global (Zhang *et al.*, 2023), y un motivo de preocupación debido al impacto en el régimen hidrológico (Garg *et al.*, 2017). La cobertura vegetal es un indicador de los procesos biofísicos, determinando el grado de conservación de los ecosistemas. La identificación de la cobertura permite el monitoreo de la dinámica interna del territorio, clave para evaluar el impacto de las políticas ambientales, apoyar la toma de decisión y desarrollar alertas tempranas para prevenir, entre otras cosas, aspectos como la desertificación (Reynolds *et al.*, 2007; Saco *et al.*, 2018, Gaitan *et al.*, 2021).

La teledetección se ha vuelto esencial para la clasificación y monitoreo eficiente de las tendencias de cambios de la CUS (Rwanga & Ndambuki, 2017; Zhang *et al.*, 2017). Diversos factores han contribuido a un mayor conjunto de datos y técnicas, mejorando los resultados de la clasificación en términos de discriminación de la CUS y precisión de las clases resultantes durante el procesamiento de datos (Eiumnoh & Shrestha 2000; Yasin & Kornel, 2024; Din *et al.*, 2022). Los algoritmos de procesamiento han aumentado el uso de imágenes satelitales (*i.e.*: *Landsat*, *Sentinel*, etc.) en estudios relacionados con los cambios de CUS a múltiples escalas (Bunyangha, 2021; Nay *et al.*, 2017; Aplin & Atkinson 2004). Por tanto, la teledetección ha contribuido de manera importante al mapeo y análisis del cambio real en las CUS a escala regional y global (Garg *et al.*, 2017; Olokeogun *et al.*, 2014).

Zhang *et al.*, (2023) aprovechan la serie temporal completa de *Landsat* (1982-2022) mediante la plataforma de *Google Earth Engine* (GEE) para analizar la dinámica de cambio en las áreas de cobertura del suelo alrededor del mundo, destacando su importancia para el desarrollo sostenible, la protección del medio ambiente y la toma de decisiones. En cambio, Qiu *et al.*, (2023) proponen y evalúan algoritmos de composición de imágenes *Landsat* teniendo en cuenta el desempeño de cada algoritmo en los resultados de la clasificación de la cobertura del suelo y la detección de cambios obtenida. En adición a ello, Tobar-Díaz *et al.*, (2023) analizan los métodos de *machine learning* con implicaciones en la clasificación de la CUS en estudios publicados entre 2000 y 2020, y potenciar su correcta implementación. Por su parte, Topaloğlu *et al.*, (2016) comparan la precisión de la clasificación de los mapas de CUS del área metropolitana de

Estambul, Turquía, a partir de datos de Sentinel-2 y Landsat-8, y la aplicación de métodos de clasificación supervisados de *Maximum Likelihood* (MLC) y *Support Vector Machine* (SVM).

En el caso de México, Bonilla-Moheno y Aide (2020) analizan los cambios en el uso del suelo en México entre 2001 y 2014 utilizaron imágenes MODIS (250 m) para identificar las regiones con ganancias o pérdidas significativas de vegetación leñosa, pastizales o tierras de cultivo. A su vez, Revuelta-Acosta *et al.*, (2023) analizan los cambios en la CUS en Coatzacoalcos, Veracruz, entre 2015 y 2021 utilizando imágenes *Landsat 8 Operational Land Imager (OLI)* para promover el desarrollo territorial sostenible; mientras, Espinoza-Guzmán *et al.*, (2023) evalúan los cambios de CUS en el parque nacional “Cofre de Perote”, Veracruz, mediante imágenes Sentinel-2 entre 2017 y 2021 para detonar acciones de conservación en este ecosistema. Asimismo, en la cuenca del Río Usumacinta Gallardo-Cruz *et al.*, (2019) analizan los datos de cobertura arbórea de 2000 y 2012 a partir de diferentes fuentes espaciales; mientras que, Peralta-Carreta *et al.*, (2019) analizan datos espaciales nacionales e internacionales para la clasificación del uso de suelo y vegetación en áreas de pérdida de cobertura arbórea entre 2000 y 2016 en esta cuenca.

La Cuenca Baja del Río Usumacinta (CBRU) es receptora de grandes volúmenes de agua que configuran una llanura aluvial caracterizada por su riqueza hídrica, biodiversidad, diversidad cultural; además de procesos intensivos de cambios ambientales reportados en esta región (Gallardo-Cruz *et al.*, 2019; Peralta-Carreta *et al.*, 2019; Vaca *et al.*, 2019). Sin embargo, existe una brecha en la información disponible sobre metodologías para la toma de decisiones y la planificación sistematizada a nivel local (López & Saavedra, 2023), lo que representa un punto de partida para la evaluación y el monitoreo de las tendencias en las condiciones de los recursos naturales y la efectividad de la política pública (Rwanga & Ndambuki, 2017).

Desde esta perspectiva, el objetivo de la investigación es evaluar la clasificación de la Cobertura y Usos de Suelos (CUS) de la Cuenca Baja del Río Usumacinta (CBRU) para 2021 obtenida de imágenes *Landsat 8 OLI* a partir del uso de dos algoritmos de clasificación, uno paramétrico MLC (*Maximum Likelihood Classification*) y el otro no paramétrico ISODATA (*Iterative Self-Organizing Data Analysis Techniques*), con la finalidad de identificar las coberturas y usos del suelo, resaltar las potencialidades para el uso estas herramientas a nivel local; además de recomendar estrategias para la toma de decisión.

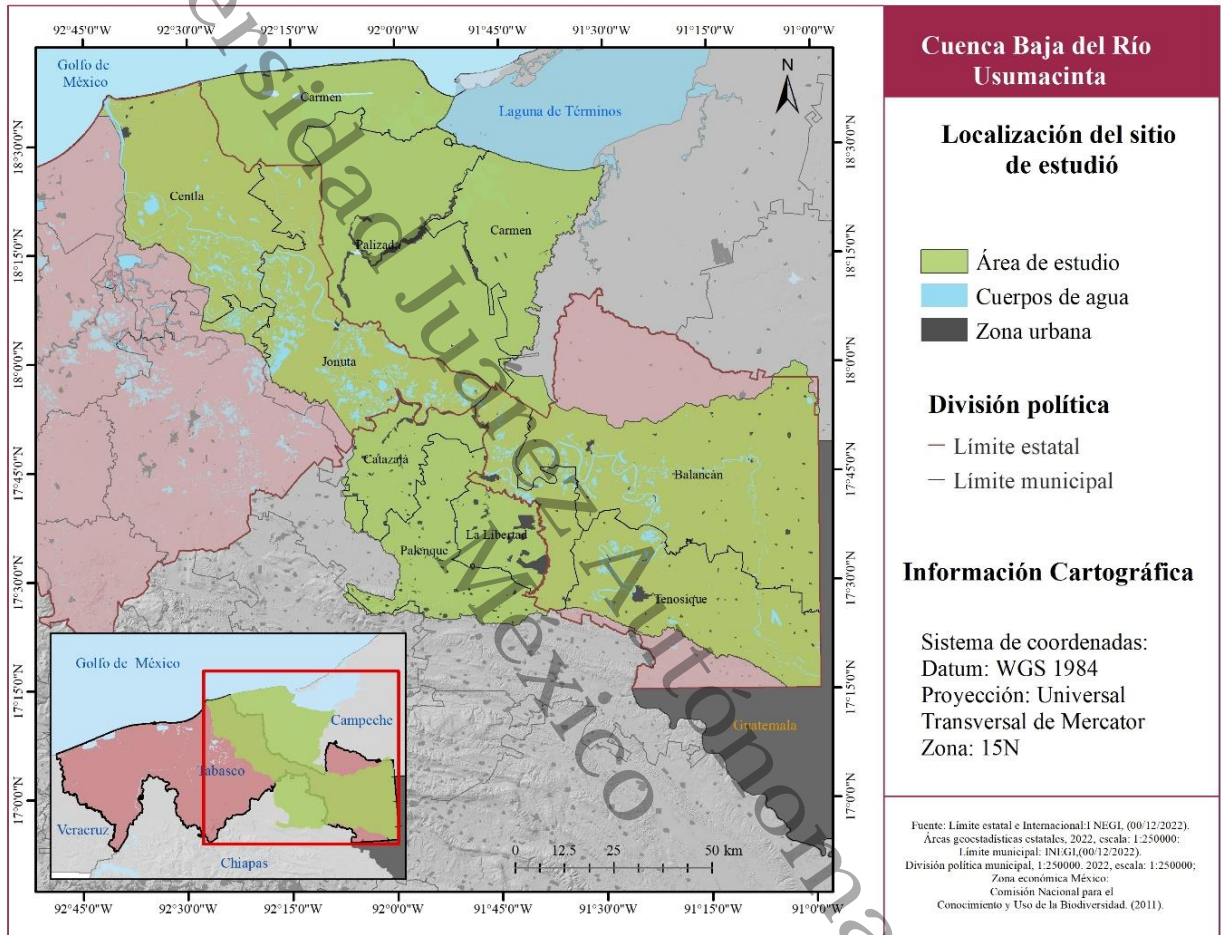
## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

La cuenca transfronteriza del río Usumacinta abarca una superficie de 77,265 km<sup>2</sup>, alberga el río más largo (con 1,100 km) (Kauffer, 2021) y caudaloso de Mesoamérica (1,700 m<sup>3</sup> /s) (March-Mifsut & Castro, 2010). Esta cuenca representa un territorio hídrico compartido por las fronteras administrativas de México, Guatemala y Belice. El río Usumacinta corre en la cuenca alta y media de Guatemala hasta llegar a la Cuenca Baja del Río Usumacinta (CBRU) que comprende una superficie de 1,429.41 km<sup>2</sup>, distribuidas entre los estados mexicanos de Chiapas (12%), Campeche (31%) y Tabasco (55%) antes de desembocar en el Golfo de México (Figura 1) Gallardo-Cruz *et al.*, (2021). El área de estudio utilizada fue definida a partir de los criterios establecidos por Gallardo-Cruz *et al.*, (2019).

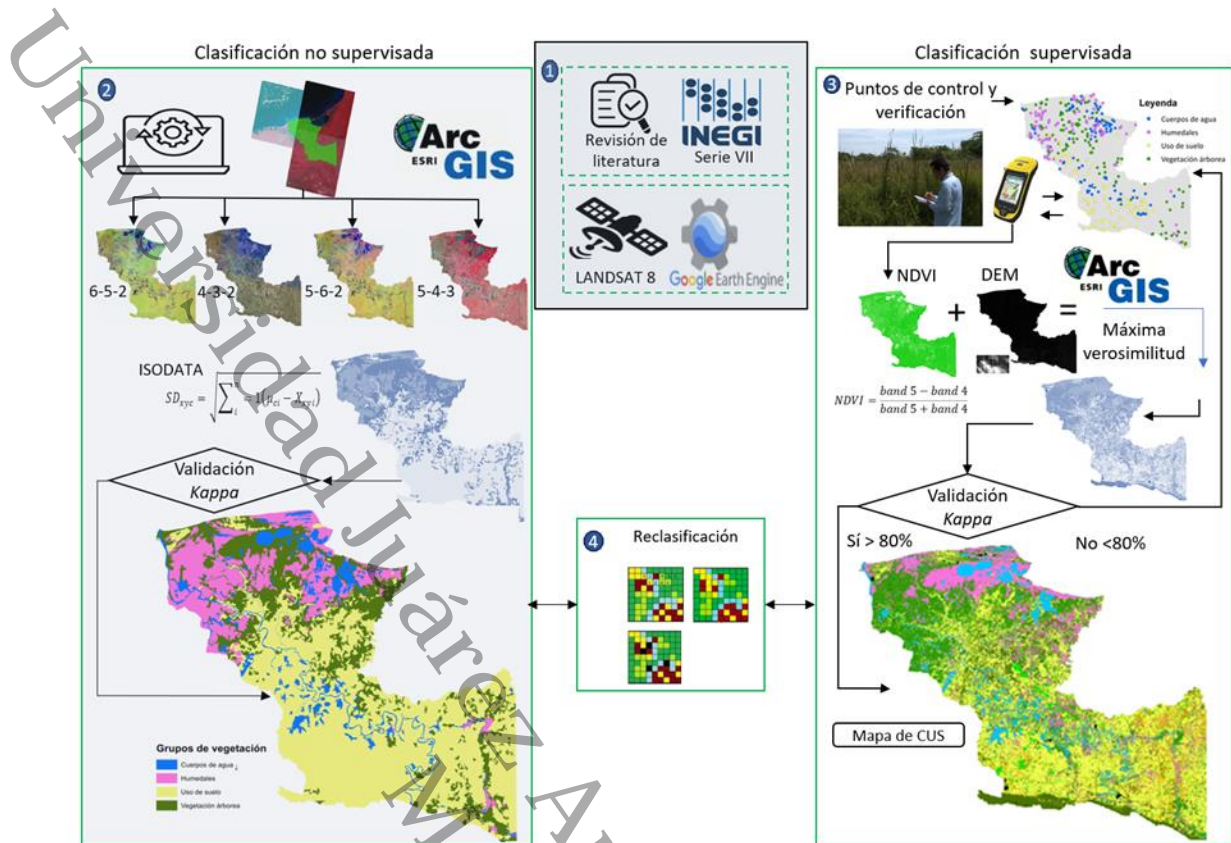
El cauce en la CBRU posee una elevación promedio de 50 m s.n.m., y su fisiografía se compone de las Llanuras, Humedales Tabasqueños y en menor proporción, la Sierra del Norte de Chiapas, Lacandona y Bajas del Petén. La climatología de la zona se clasifica como Af (m) w'(i) g (García, 1988), cálido húmedo con altas temperaturas (26.9 °C) y precipitaciones (2,274 mm) durante todo el año. El mes de mayo es el más cálido (35.5 °C) y enero es el más frío (18.6 °C), la temporada de lluvia se presenta durante los meses de junio y noviembre, siendo septiembre el más lluvioso con 351.2 mm (CONAGUA, 2023). Respecto a la edafología (Palma *et al.*, 2007; Sánchez *et al.*, 2013, Castillo & Medrano, 2023) reporta que los suelos predominantes en la CBRU son Gleysoles, Vertisoles, Solochaks, Fluvisoles. Estas características influyen en la diversidad de especies de la CBRU, donde la vegetación es heterogénea,

predominado los pastizales cultivados, agricultura de temporal, pesca, industria petrolera y agroindustria. Además, existen ecosistemas representativos del bosque tropical perennifolio, humedales, manglares y bosque sub-perennifolio (Rzedowsky, 1998), donde se encuentran la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla y el Área de Protección de Flora y Fauna Cañón del Usumacinta, Área Natural Protegida de Laguna de Términos, albergando una población de 201,548 habitantes distribuida en 1,185 localidades (Sernapam, 2013).



**Figura 1.** Ubicación espacial del área de estudio.  
**Figure 1.** Spatial location of study area

El enfoque metodológico utilizado en esta investigación incluye las siguientes fases: (i) recopilación de datos de imágenes de satélite y vectorial; (ii) procesamiento de datos a través del algoritmo para la clasificación no supervisada (ISODATA) y para la clasificación supervisada por el método de Máxima Verosimilitud (*MLC*, por sus siglas en inglés); y (iii) evaluación de la precisión de las clasificaciones. El flujo general metodológico del tratamiento de datos se ilustra en la Figura 2 y se describen a detalle los pasos seguidos en las diferentes secciones a continuación.



**Figura 2.** Diagrama de flujo del análisis de coberturas y usos del suelo de la CBRU.  
**Figure 2.** CBRU land cover and land use analysis flow chart.

### Base de datos

Se utilizaron datos raster del Modelo digital de elevación (*DEM*, por sus siglas en inglés) a 50 x 50 m (INEGI, 2012), datos vectoriales de la cartografía *shapefiles* de Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie VII nacional (INEGI, 2013), como referencia para identificar los tipos de coberturas y usos del suelo. Además, para evitar el error de temporalidad, se utilizaron imágenes multiespectrales de la nube de *Google Earth Engine* (<https://earthengine.google.com/>, consultado el 20 de septiembre de 2022) registradas por los sensores *Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) + Thermal Infrared Sensor (TIRS)* para la CBRU. La consulta se realizó mediante un código programado en JavaScript utilizando las colecciones de mayor calidad (Tier 1) y para mitigar la limitación que surge debido a la nubosidad (Tziolas *et al.*, 2020), se aplicó el criterio de selección de nubes (<10%) para obtener una imagen compuesta por promedios del año 2021, a una resolución de píxel de 30 metros.

### Preprocesamiento

Se llevó a cabo el procesamiento de imágenes de satélite en la aplicación ArcMap v. 10.8 del software ArcGis v. 10.8 (Figura 2). El área de estudio utilizada fue definida apartir de los criterios establecidos por Gallardo-Cruz *et al.*, (2019), y para el análisis de las firmas espectrales se realizaron combinaciones de bandas (B6-B5-B2; B4-B3-B2; B6-B5-B2 y B5-B4-B3). Además, se realizó la revisión de literatura para identificar los grupos de coberturas y usos de suelo representativos de la CBRU (Meave, 2022; Tabla 1).

Tabla 1. Grupos de coberturas y uso de suelos considerados en la clasificación no supervisada.  
 Table 1. Land cover and land use groups considered in the unsupervised classification.

Grupo	Subgrupo
Humedales (Hum)	Vegetación hidrofita, popal
Uso del suelo (Us)	Agricultura, pastizal, urbano
Vegetación arbórea (Va)	Vegetación secundaria
Cuerpo de agua (Ca)	Río, lago

### Selección de algoritmos

La selección de los algoritmos *Maximum Likelihood Classification (MLC)* e *Iterative Self-Organizing Data Analysis Techniques (ISODATA)* para la clasificación de la cobertura y usos del suelo (CUS) en la Cuenca Baja del Río Usumacinta (CBRU) se basan en la robustez y amplio uso en la teledetección (*i.e.*: Gallardo *et al.*, 2019; Makandar & Kaman, 2021; Ramírez *et al.*, 2022;). El algoritmo *MLC* es un método paramétrico bien establecido que considera la variabilidad espectral entre clases, además permite incorporar información complementaria (puntos de entrenamiento) Yasin & Kornel (2024) mejorando la precisión de la clasificación supervisada; de acuerdo con (Wu & Murray, 2003; Shalaby & Tateishi 2007) el algoritmo no paramétrico ISODATA, no requiere conocimiento previo de las firmas espectrales permitiendo un ajuste automático según el número de clasificación y número de clases de manera iterativa y eficiente. Ambos algoritmos superan a otros métodos (*i.e.*: K-Means, Mínima Distancia o Paralelepípedo) en términos de precisión y manejo de valores atípicos. Aunque existen técnicas avanzadas (*i.e.*: Random Forest, Redes Neuronales y Máquinas de Vectores de Soporte) que ofrecen resultados más precisos, estas demandan una mayor cantidad insumos y de datos de entrenamiento para un ajuste más complejo de hiperparámetros, que representa un desafío en el contexto de la CBRU donde los recursos y datos de referencia pueden ser limitados (Guzmán *et al.*, 2023; Rodríguez-Valero & Alonso-Sarria, 2021; Fernández-Fierro *et al.*, 2020).

### Clasificación no supervisada (CNS)

De las técnicas de clasificación no supervisadas se utilizó el análisis ISODATA (*Iterative Self-Organizing Data Analysis Techniques*), el cual considera la distancia espectral mínima para la agrupación de conglomerados en función a la distancia euclidiana (ecuación 1), y no requiere conocimientos previos del área de estudio (Lemenkova, 2021 a).

$$SD_{xyc} = \sqrt{\sum_i^n = 1(\mu_{ci} - X_{xyi})} \quad (1)$$

**Donde:**  $n$  = número de bandas;  $i$  = número de banda;  $c$  = clases específica;  $X_{xyi}$  = valor del archivo de datos del píxel  $X$ , y en banda  $i$ ;  $\mu_{ci}$  = media de los valores del archivo de datos (números digitales); en  $i$  para la muestra de clase  $c$ ;  $SD_{xyc}$  = Distancia espectral de los píxeles  $x, y$ , el valor medio de la clase  $c$ .

Para esta clasificación se adoptó un mínimo de cuatro y un máximo de ocho clases permitiendo realizar una clasificación completa y su validación del Índice Kappa (Reynoso *et al.*, 2015). Los parámetros asignados para cada mapa de clasificación se mantuvieron iguales, incluido el número máximo de 4 grupos propuestos en la Tabla 1 (Lemenkova, 2021).

### Posprocesamiento

Las clases grupos formados se reagruparon con la técnica de agrupamiento jerárquico de Ward, que está diseñado para optimizar la varianza mínima en los grupos (Ward, 1963; Bahadur, 2012). Esta técnica calcula las medias para cada variable dentro de cada grupo y la distancia euclidiana al cuadrado de las medias del grupo para cada caso (Langford, 1997). Las distancias se suman para todos los casos y en cada paso, los dos grupos que se fusionan son aquellos que dan como resultado el menor aumento en la suma general de las distancias al cuadrado dentro del grupo. Las clases resultantes se identificaron sobre la base

del conocimiento extraído de la revisión de literatura, del análisis de la serie VII de INEGI y procesos en *Google Earth* (Ramírez *et al.*, 2022).

### Validación CNS

Los resultados de cada mapa de clasificación se compararon por separado con la matriz de confusión y precisión general de la clasificación (ERDAS, 1999). Finalmente, se seleccionó el mapa de clasificación que mostró resultados aproximados o superiores al índice Kappa, como técnica multivariada discreta en la evaluación de la precisión temática, que utiliza todos los elementos de la matriz de confusión (Cohen, 1960; ecuación 2). durante la clasificación no supervisada.

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^r X_{ij} - \sum_{i=1}^r X_{i+} X_{+i}}{N^2 - \sum_{i=1}^r X_{i+} X_{+i}} \quad (2)$$

**Donde:** K: índice Kappa; N: Número de datos muestreados;  $X_{ij}$ : Número de observaciones;  $X_{i+}$   $X_{+i}$ : Concordancia esperada

Para evaluar el índice Kappa se utilizaron los criterios de Landis y Koch (1977), donde los valores menores a 0.4 representan una concordancia pobre; valores entre 0.4 y 0.8 una concordancia moderada; y, valores mayores a 0.8 una concordancia fuerte.

### Clasificación supervisada (CS)

La clasificación supervisada utilizando el algoritmo de *Máxima Verosimilitud* (MLC, por sus siglas en inglés) método más utilizado entre los enfoques de clasificación paramétrica (Maselli *et al.*, 1992; Sisodia *et al.*, 2014). Esta metodología supone que los datos se distribuyen de acuerdo con al modelo de probabilidad predefinido y los parámetros de esta distribución dependen de los datos de entrada de los sitios de entrenamiento (Ahmad & Quegan 2012). Para ayudar MLC, se calculó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) con la ecuación 3 (Zhang *et al.*, 2006) y se utilizó el DEM (Eiumnoh, 2000, Kassahun *et al.*, 2024) y evitar la confusión del valor espectral del bosque tropical y plantaciones forestales comerciales (Wang & Yao, 2024).

$$NDVI = \frac{\text{band 5} - \text{band 4}}{\text{band 5} + \text{band 4}} \quad (3)$$

Después de obtener una clasificación adecuada de una discriminación satisfactoria entre las clases durante la evaluación de precisión, se realizó la clasificación final para producir un mapa de coberturas y uso de suelo 2021.

### Evaluación

La precisión del mapa de CUS 2021 se evaluó de acuerdo con Congalton & Green (2019) a través de muestreo en campo, se establecieron 948 puntos de control y 330 puntos de verificación de forma aleatoria, las coordenadas geográficas (UTM), se almacenaron en un GPS Trimble Geo 7X®; considerando los criterios de accesibilidad y distancia de la carretera al punto de muestreo por cada categoría, describiendo los tipos de coberturas y usos observado de acuerdo con Meave *et al.* (2022) (Tabla 2).

La precisión de la clasificación se evaluó mediante una matriz de confusión, que permite confrontar la información de los sitios de muestreo y la imagen clasificada (García-Mora & Mas, 2008); además se determinó el índice Kappa para establecer la concordancia estadística de la matriz (Ecuación 4) (Bishop *et al.*, 1977; Foody, 2020), siendo regular (0.40 - 0.60), bueno (0.61 – 0.75) y excelente > 0.75 (Fleiss, 1981; Guzmán, *et al.*, 2023).

Tabla 2. Tipos de coberturas y usos del suelo  
**Table 2.** Types of land cover and land uses

Grupo	Clave	Coberturas y usos de suelo	Descripción
Uso de Suelo	PF	Plantaciones forestales	Plantaciones forestales de caoba, teca, melina y hule
	PA	Palma de aceite	Establecimiento de palma de aceite
	AGP	Agropecuario	Sistemas de agropecuario, pastizal cultivado, cultivos agrícolas, ganadería intensiva
	URB	Urbano	Asentamientos humanos e Infraestructura carretera, ejidos, ciudades
Cuerpo de agua	CA	Cuerpo de agua	Sistemas estuarios, lagunas costeras, canales, cauces de ríos, excluyendo el Océano Pacífico y estanques de actividad acuícola
Humedales	HUM	Humedales	Pueden presentarse con o sin vegetación (vegetación hidrófila en asociación con la especie de <i>Quercus oleoides</i> , <i>Thali geniculata</i> , <i>typha latifolia</i> , <i>Haematoxylum campechianum</i> )
Vegetación arbórea	BI	Bosque inundado	Asociaciones de hidrófilas dominadas por especies de manglar ( <i>Laguncularia racemosa</i> , <i>Rhizophora mangle</i> , <i>Avicennia germinans</i> , <i>Pachira aquatica</i> ).
	BT	Bosque tropical	Vegetación secundaria de selva baja y mediana subcaducifolia, asociaciones de arbustos y vegetación perturbada.

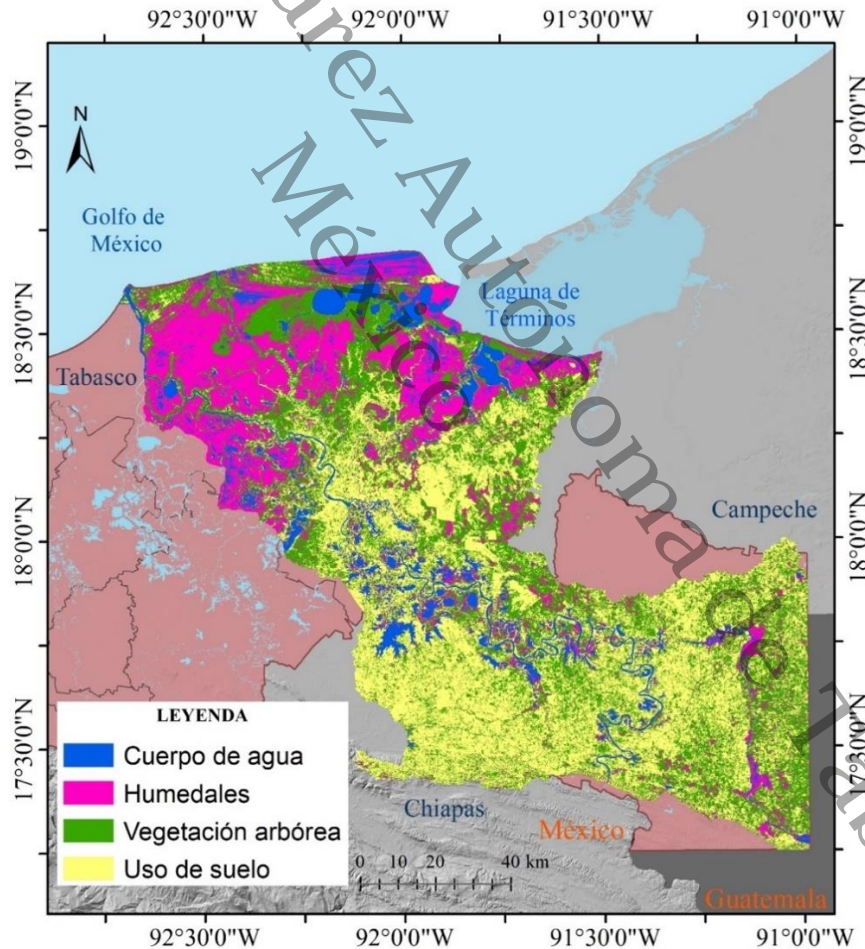
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La clasificación de las imágenes satelitales de la cuenca baja del río Usumacinta se realizó utilizando dos enfoques diferentes: clasificación no supervisada (CNS) y clasificación supervisada (CS). A continuación, se presentan los resultados de cada método.

### *Clasificación no supervisada*

Utilizando el algoritmo de clasificación ISODATA, se identificaron patrones iniciales de la cobertura del suelo basados en la agrupación de píxeles similares, permitiendo una primera aproximación a la distribución de los diferentes tipos de cobertura de la cuenca baja. Las clases de cobertura identificadas fueron: Cuerpos de Agua, Humedales, Vegetación arbórea y Uso de suelo (Tabla 2). En la Figura 3 se muestra la distribución de estas clases, observándose que el 55% está ocupado por el uso de suelo, seguido por el 16% de los humedales, los cuales se distribuyen principalmente en la parte norte de la cuenca, mezclándose con zonas de vegetación arbórea que se encuentran de norte a sur de la zona de estudio y ocupan el 21% del territorio. El uso de algoritmos de clasificación basados en características espectrales, como el ISODATA, ha demostrado ser altamente efectivos en la identificación de coberturas de suelo. De acuerdo con Abbas *et al.*, (2016) tanto el ISODATA y K-means son capaces de agrupar píxeles con características similares para discriminar distintas clases de cobertura de suelo; por su parte, Melesse y Jordan (2022) lograron separar nubes y sombras de una imagen Landsat al combinar el ISODATA con otros parámetros espectrales.

En este contexto, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y las técnicas de percepción remota son herramientas eficientes para la identificación de coberturas y usos de suelo (Dangia & Dessalegn, 2020; Belayneh *et al.*, 2020). La clasificación no supervisada fue más efectiva en la identificación de tipos de cobertura vegetal que representan grupos generales (humedales, uso de suelo, cuerpos de agua y vegetación arbórea). Sin embargo, como indican Zubaidi & Khafaji (2024), esta clasificación extrae un número limitado de categorías debido a la proximidad de píxeles y características estadísticas. Orjuela (2019) señala que los clústeres se distinguen por valores espectrales (media, desviación estándar, covarianza y matrices de correlación), aunque Vega *et al.*, (2008) advierten que la variabilidad del valor espectral de los píxeles tiende a confundirse con un mayor número de coberturas, como ocurre en la Cuenca Baja del Río Usumacinta (CBRU). Este método de clasificación obtuvo un bajo porcentaje de precisión (67%), quedando por debajo de los valores de referencia sugeridos por Chuvieco (2022) (80%). En este sentido, la baja precisión de esta clasificación (67% de precisión y un índice Kappa de 0.51), se puede atribuir a la heterogeneidad tropical del área (Gallardo *et al.*, 2019; Meave, 2022) y la fragmentación de la CBRU (Tudela, 1989); y por tanto, los resultados deben interpretarse con cautela. La clasificación no supervisada se presenta como un primer acercamiento del conocimiento de un territorio permitiendo describir variaciones y patrones de cambio en el paisaje (Cotler *et al.*, 2010; Zhao *et al.*, 2012; Trujillo-Jiménez *et al.*, 2022;), lo que resulta fundamental para la planificación a mediano y largo plazo del territorio a través del ordenamiento territorial y planes de conservación (Mulatu *et al.*, 2024).



**Fuente:** Límite estatal e Internacional: INEGI (00/12/2022). Áreas geoestadísticas estatales, 2022, escala: 1:250000; Límite municipal INEGI (00/12/2022). División política municipal, 1:250000. 2022, escala: 1:250000; Zona económica México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2011). Sistema de coordenadas: Datum: WGS 1984; Proyección: Universal Transversal de Mercator; Zona: 15N

**Figura 3.** Distribución de las clases de cobertura de suelo, mediante la clasificación no supervisada en la CBRU 2021.  
**Figure 3.** Distribution of land cover classes by unsupervised classification in the CBRU 2021.

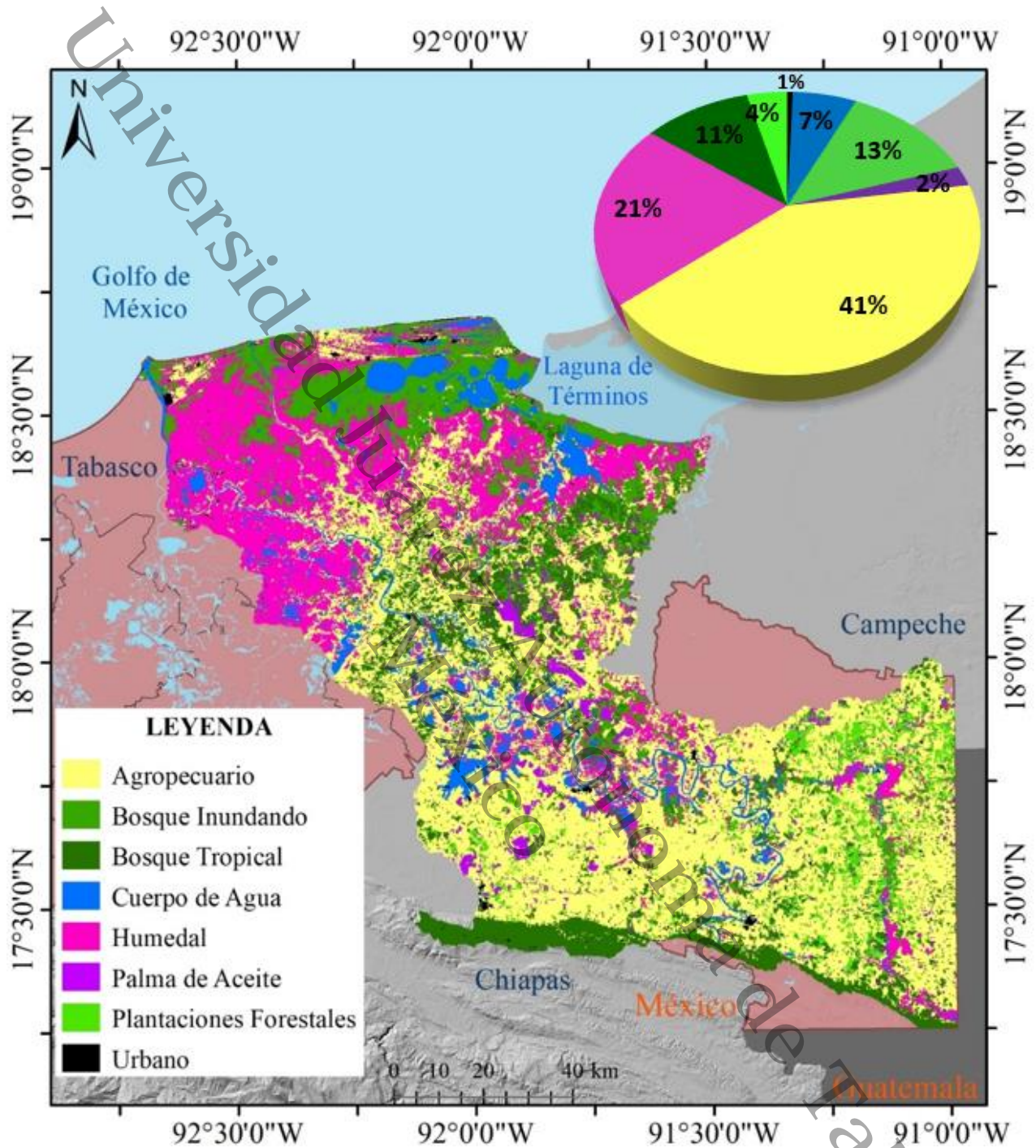
Una de las ventajas de esta clasificación es su rapidez en el procesamiento de datos. Rullan *et al.*, (2011) clasificaron las coberturas de suelo de la región Sierra de Tabasco mediante una clasificación no supervisada e imágenes Landsat ETM+, que requieren bajos insumos técnicos y económicos (R *et al.*, 2020). Con el objetivo de optimizar recursos, Ma *et al.*, (2020) utilizaron la clasificación no supervisada para la clasificación de cultivos, considerándola una herramienta útil para el monitoreo, diagnóstico e incidencia en la ejecución de políticas públicas o planes de desarrollo en la gestión del territorio.

#### *Clasificación supervisada*

La combinación de los puntos de control, la imagen de satélite y el algoritmo de máxima verosimilitud permitió realizar una clasificación de las coberturas de suelo con mayor detalle y precisión para el año 2021. Utilizando 948 puntos de control, fue posible identificar diferentes clases de cobertura, tales como agropecuario, bosque inundado, bosque tropical, cuerpos de agua, humedal, palma de aceite, plantaciones forestales y urbano. En la Figura 4 se muestra la distribución de las clases de cobertura, destacando la clase agropecuaria con el 41% de la superficie, que representa zonas de agricultura y ganadería. Los humedales ocupan el 21% de la superficie y son principalmente zonas de vegetación herbácea (Figura 6). Los bosques inundados se localizan principalmente en los municipios de Centla, E. Zapata, y Jonuta, Tabasco representan el 13% y están compuestos por especies arbóreas como el mangle. El bosque tropical ocupa el 11% de la superficie de la cuenca y se caracteriza por la presencia de árboles de tinto. Hacia la zona oeste, en los municipios de Balancán y Emiliano Zapata, se distribuyen principalmente las plantaciones forestales, que ocupan el 4% de la zona de estudio. Una clase que ha incrementado considerablemente en los últimos años es la palma de aceite, que ahora ocupa el 2% de la superficie de la cuenca baja (Tabla 3). Estos datos coinciden con Ramírez *et al.*, (2022) quienes determinaron que el uso agropecuario se ha incrementado de un 14% a un 61% en un periodo de 72 años, siendo la clase predominante en el paisaje de la región de Los Ríos.

Por otro lado, la clasificación supervisada (CS) mostró una alta precisión del 92%, con un índice Kappa de 0.90, superior a lo obtenido por Mengqi *et al.*, (2024) en el estudio de clasificación de imágenes multispectral. Esta clasificación se caracteriza por extraer información espectral de los píxeles de la imagen satelital, siendo el algoritmo más utilizado el de máxima verosimilitud (Richards & Jia, 2006; Ahmad & Qegan, 2012; Yang *et al.*, 2020; Richards, 2022). Este algoritmo utiliza datos de entrenamiento a través de estimaciones de varianza media de las clases y matrices de covarianza (Perumal & Bhaskaran, 2010). Los resultados de precisión alcanzados para la CBRU superan los obtenidos por Padilla-Romero & Hernández-Juárez (2023) y Jiménez *et al.*, (2018) en estudios sobre cambios de uso de suelo en el Estado de México y en la zona metropolitana de Tepic, Nayarit, respectivamente.

Según Palaniswami (2006), la combinación de NDVI, DEM, número de puntos de entrenamiento y extracción del valor de firmas garantiza una buena clasificación de imágenes y facilita la discriminación de firmas espectrales (Bendib & Boutrid, 2024; Eiumnoh & Shrestha, 2000), aumentando el *accuracy* de la clasificación entre un 10% y un 20%. Al utilizar datos auxiliares, se logró un *accuracy* superior al 80% en todas las categorías identificadas: agropecuario (95%), bosque inundado (90%), bosque tropical perennifolio (88%), cuerpos de agua (92%), humedales (92%), palma de aceite (94%), plantaciones forestales comerciales (93%) y urbano (95%). Estos resultados son consistentes con los reportados por Yocouba *et al.*, (2009) y Sahebjalal y Dashtekian (2013).



Fuente: Límite estatal e Internacional: INEGI (00/12/2022). Áreas geoadministrativas estatales, 2022, escala: 1:250000; Límite municipal INEGI (00/12/2022). División política municipal, 1:250000. 2022, escala: 1:250000; Zona económica México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2011). Sistema de coordenadas: Datum: WGS 1984; Proyección: Universal Transversal de Mercator (UTM); Zona: 15N

Figura 4. Distribución de las clases de cobertura de suelo a partir de la Clasificación supervisada en la CBRU 2021.

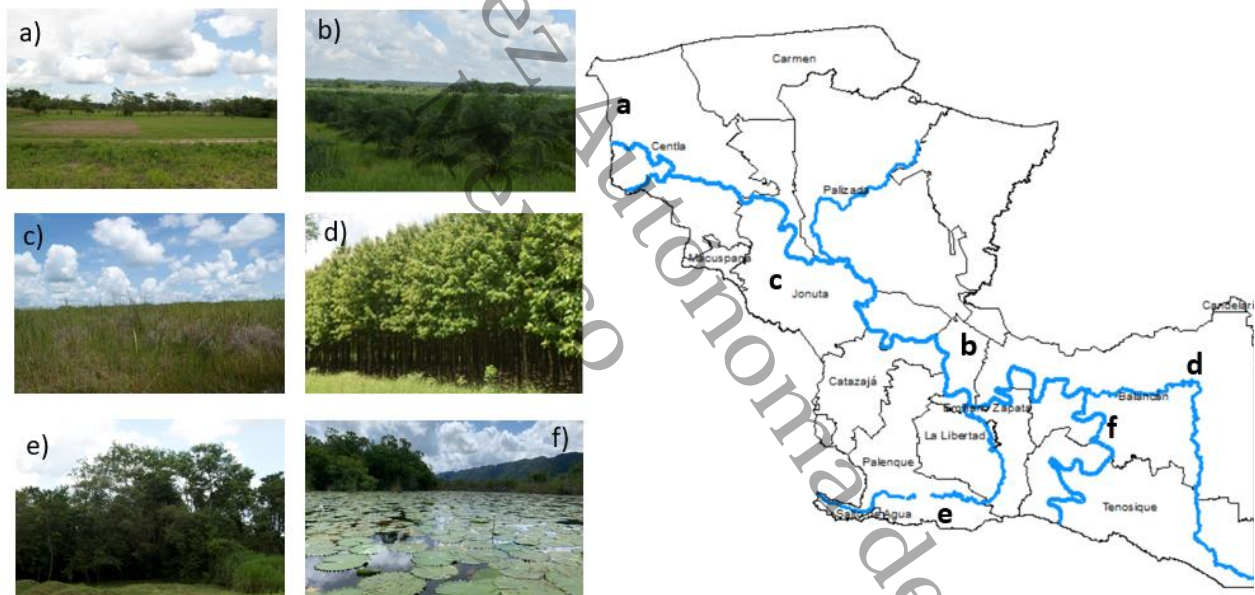
Figure 4. Distribution of land cover classes based on the supervised classification in the CBRU 2021

**Tabla 3.** Distribución de CUS 2021 de la CBRU  
**Table 3.** Distribution of CUS 2021 CBRU

Coberturas y uso de suelo	Clave	Hectáreas (Ha)	%
Agropecuario	AGP	592,621	41
Bosque inundado	BI	187,928	13
Bosque tropical	BT	153,774	11
Cuerpo de agua	CA	92,417	6
Humedales	HM	302,616	21
Palma de aceite	PA	33,475	2
Plantaciones forestales comerciales	PFC	58,529	4
Urbano	URB	8,005	1
<b>Superficie Total</b>		<b>1,429,365.41</b>	

**Figura 5.** Representación de coberturas y usos de la CBRU 2021: a) Humedales, b) Palma de Aceite, c) Agropecuario, d) Plantaciones forestales, f) Bosque tropical e) cuerpos de agua.

**Figure 5.** Representation of coverages and uses of the CBRU 2021: a) Wetlands, b) Oil palm, c) Agriculture and livestock, d) Forest plantations, f) Tropical forest, e) Water bodies.



Los índices espectrales se utilizan para mejorar la detección de la presencia o ausencia de cobertura vegetal, generando relaciones con las bandas normalizadas (Mohammed *et al.*, 2013). El índice de vegetación normalizada (NDVI) es un indicador de la cobertura vegetal a gran escala y de la productividad (Sun & Quin, 2016), que refleja la salud de la vegetación en función de cómo las plantas reflejan rangos específicos del espectro electromagnético. A través de la teledetección, los SIG y el uso del NDVI (Peters *et al.*, 2002, Makandar & Kaman, 2021, Nay *et al.*, 2017) mejoraron significativamente la precisión de la clasificación de coberturas vegetales obtenidas para la CBRU.

Además, al integrar el Modelo Digital de Elevación (DEM) en la clasificación de imágenes, se logró una mejor precisión en la clasificación de coberturas y usos del suelo (Palacio-Prieto & Luna-González, 1996), permitiendo discriminar componentes del terreno en relación con la respuesta espectral y estratificar

zonas homogéneas (Bahadur, 2012). Por lo tanto, el uso del DEM facilitó la diferenciación entre las clases de plantaciones forestales y el bosque tropical perennifolio en la CBRU.

Sin embargo, es importante señalar que, según Govender *et al.*, (2008), una de las desventajas de la clasificación supervisada es la necesidad de un conocimiento profundo de la región de estudio, así como mayores insumos tecnológicos y económicos para el procesamiento de datos y el trabajo de campo.

Desde esta perspectiva, la clasificación de coberturas y usos de suelo (CUS) mediante técnicas de teledetección representa una herramienta esencial para los tomadores de decisiones, gobiernos locales y partes interesadas en la protección y gestión del territorio. Este estudio ha demostrado que el mapeo preciso de las CUS permite identificar patrones de uso del suelo y cambios en el paisaje, claves para la planificación territorial y la conservación de recursos naturales. La integración de datos como el NDVI y el DEM, junto con algoritmos de clasificación avanzados, SIG y software (*i.e.*, QGIS, ArcGIS), mejora la precisión de los resultados y contribuye a la toma de decisiones informadas en contextos locales complejos, especialmente en regiones tropicales vulnerables con alta biodiversidad, como la Cuenca Baja del Río Usumacinta (CBRU). Además, estos métodos generan información actualizada que sirve de base para la implementación de estrategias efectivas para el desarrollo sostenible y la gestión de áreas naturales protegidas, como la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla. En este sentido, los resultados no solo contribuyen al conocimiento científico, sino que también ofrecen herramientas prácticas que los gobiernos locales y actores interesados pueden utilizar para abordar desafíos ambientales y sociales, promoviendo un aprovechamiento responsable y sostenible del territorio.

## CONCLUSIONES

Los resultados muestran la efectividad de utilizar una imagen satelital compuesta Landsat 8 OLI del 2021, datos auxiliares como el NDVI y DEM, y métodos de clasificación para el mapeo preciso de las coberturas y usos de suelo (CUS) en la Cuenca Baja del Río Usumacinta (CBRU), resaltando la importancia de aplicar técnicas de teledetección avanzadas para monitorear los cambios en el uso del suelo en esta región de alta biodiversidad.

La clasificación no supervisada ISODATA permitió identificar cuatro clases generales de CUS (humedales, vegetación arbórea, cuerpos de agua y uso de suelo) de manera rápida y eficiente. Sin embargo, presentó limitaciones para diferenciar clases específicas como bosques tropicales, bosques inundados y plantaciones de palma de aceite. Por otro lado, la clasificación supervisada MLC, apoyada en los puntos de entrenamiento y datos auxiliares NDVI y DEM, logró un mapeo más detallado discriminando clases como agropecuario (41%), humedales (21%), plantaciones forestales (4%) y áreas urbanas (1%), con una excelente precisión (índice Kappa de 0.90).

El uso combinado de datos auxiliares del NDVI y DEM fue clave para mejorar la discriminación espectral de coberturas complejas como el bosque tropical y los humedales en la clasificación supervisada. Estos resultados resaltan el potencial de combinar información espectral, estructural y topográfica para lograr una clasificación de CUS más precisa.

Los resultados representan una contribución para tomadores de decisión y partes interesadas en torno a la planificación territorial, el manejo de recursos naturales y los esfuerzos de conservación de la biodiversidad en la CBRU. Se recomienda explorar técnicas de clasificación basadas en objetos, utilizar imágenes de alta resolución, integrar datos de campo para validación y analizar series temporales para monitorear la dinámica de cambios en las CUS a lo largo del tiempo en la CBRU. En general, esta investigación demuestra la importancia de las técnicas de teledetección como herramienta clave para el monitoreo y la gestión sostenible de cuencas prioritarias como la del Río Usumacinta en el sureste de México.

## DECLARACIÓN DE ÉTICA

“No aplicable”

### CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

Todos los autores han leído y aprobado el manuscrito final y han dado su consentimiento para su publicación.

### DISPONIBILIDAD DE DATOS

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

### CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

### FINANCIACIÓN

No aplicable.

### CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

**H.J.M.V.:** conceptualización, metodología, software, validación, análisis formal, investigación, escritura: preparación del borrador original, escritura: revisión y edición, visualización; **C.P.C.:** conceptualización, curación de datos, análisis formal, investigación, escritura: preparación del borrador original, escritura: revisión y edición; **O.R.M.P.:** conceptualización, curación de datos, análisis formal, investigación, escritura: preparación del borrador original, escritura: revisión y edición; **M.P.C.:** supervisión, revisión y edición; **R.R.R.:** supervisión, revisión y edición; **A.G.A.** Seguimiento en la escritura y clasificación.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a los revisores anónimos por sus comentarios y sugerencias en la mejora de esta investigación. Asimismo, HJMV agradece al Programa de Doctorado en Ciencias en Ecología y Manejo de Sistemas Tropicales de la División de Ciencias Biológicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), y recibir una beca (293867:) del Consejo Nacional de Ciencia, Humanidades y Tecnología (CONAHCYT). Al Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad (CCGS) por el apoyo y las instalaciones brindadas para llevar a cabo esta investigación durante la realización de la estancia doctoral. Además, ORMP agradece al programa Investigadores por México y al proyecto Cátedras-CCGS número 963 “Hacia la gestión sustentable del agua en el sureste de México y áreas adyacentes de Centroamérica”.

### LITERATURA CITADA

- Abbas, A. W., Minallh, N., Ahmad, N., Abid, S. A. R., & Khan, M. A. A. (2016). K-Means and ISODATA clustering algorithms for landcover classification using remote sensing. *Sindh University Research Journal-SURJ (Science Series)*, 48(2).
- Al Khafaji, R. G. A. H., & Al-Zubaidi, E. A. 2024 Unsupervised Classification of Landsat-8 Satellite Imagery-Based on ISO Clustering, *Wasit Journal of Computer and Mathematics Science*, Vol. 3 No.1 (2024) p. 40-53 <https://doi.org/10.31185/wjcms.212>
- Ahmad, A., & Quegan, S. (2012). Analysis of maximum likelihood classification on multispectral data. *Applied Mathematical Sciences*, 6(129), 6425-6436. <https://www.m-hikari.com/ams/ams-2012/ams-129-132-2012/ahmadAMS129-132-2012.pdf>
- Aplin, P. & Atkinson, PM (2004). Predecir los límites de campo faltantes para aumentar la precisión de la clasificación por campo. *Ingeniería fotogramétrica y teledetección*, 70(1), 141-149. doi:10.14358/pers.70.1.141

- Bahadur Krishna, K.C. Spatio-temporal patterns of agricultural expansion and its effect on watershed degradation: a case from the mountains of Nepal. *Environ Earth Sci* 65, 2063–2077 (2012). <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1186-6>
- Belayneh, Y., Ru, G., Guadie, A. Forest cover change and its driving forces in Fagita Lekoma District, Ethiopia. *J. For. Res.* 31, 1567–1582 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11676-018-0838-8>
- Bendib, A., Boutrid, M.L. Use of Geostatistical Methods Involving Standard Deviation and Semivariogram to Assess the Accuracy of Water Surface Extraction by Supervised Classification. *J Indian Soc Remote Sens* 52, 63–77 (2024). <https://doi.org/10.1007/s12524-023-01802-0>
- Bishop, Y.M.M., Fienberg, S.E., Holland, P.W., Light, R.J., Mosteller, F., 1977. Book Review: Discrete Multivariate Analysis: Theory and Practice. *Applied Psychological Measurement* 1(2), 297-306. <https://doi.org/10.1177/014662167700100218>
- Bonilla-Moheno, M., & Aide, T. M. (2020). Beyond deforestation: Land cover transitions in Mexico. *Agricultural Systems*, 178, 102734. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102734>
- Bunyangha, J., Majaliwa, M. J., Muthumbi, A. W., Gichuki, N. N., & Egeru, A. (2021). Past and future land use/land cover changes from multi-temporal Landsat imagery in Mpologoma catchment, eastern Uganda. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 24(3), 675-685. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.02.003>
- Castillo Cruz, Z. G., & Medrano Pérez, O. R. (2023). Análisis geomorfológico de las subcuencas Usumacinta y Grijalva en el sureste de México. *Acta Universitaria*, 33, 1–20. <https://doi.org/10.15174/au.2023.3684>
- Chuvieco E (2002) Teledetección Ambiental. Ediciones Ariel. 586 pp.
- Cohen, J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and psychological measurement*, 20(1), 37-46. <https://doi.org/10.1177/001316446002000104>
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2023). Normales Climatológica por Estado. Search to Tabasco. Servicio Meteorológico Nacional (SMN). In 27th of August 2023: <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado>
- Congalton, R. G., & Green, K. (2019). Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices. CRC press. <https://doi.org/10.1201/9780429052729>
- Cotler, H., Garrido, A., Bunge, V., & Cuevas, M. L. (2010). Las cuencas hidrográficas de México: priorización y toma de decisiones. *Las cuencas hidrográficas de México: diagnóstico y priorización*, 1, 210-215.
- Dangia, D. Dessalegn. 2020. Forest cover change detection using Geographic Information Systems and remote sensing techniques: The Spatio-temporal study on Komto Protected Forest priority area, East Wollega Zone, Ethiopia. *J. Environ Syst. Res*, 2-14.
- Din, M. S. U., Mubeen, M., Hussain, S., Ahmad, A., Hussain, N., Ali, M. A., & Nasim, W. (2022). World nations priorities on climate change and food security. *Building Climate Resilience in Agriculture: Theory, Practice and Future Perspective*, 365-384. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-79408-8\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-030-79408-8_22)
- Eiumnroh, A., & Shrestha, R. P. (2000). Application of DEM data to Landsat image classification: Evaluation in a tropical wet-dry landscape of Thailand. *PE & RS- Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 66(3), 297-304.
- ERDAS. 1999. *Erdas Field Guide*. Fifth edition revised and expanded. Atlanta Georgia, USA. Erdas Inc. 698 p.
- Espinoza-Guzmán, M. A., Borrego, D. A., & Sahagún-Sánchez, F. J. (2023). Evaluation of recent land-use and land-cover change in a mountain region. *Trees, Forests and People*, 11, 100370. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2023.100370>
- Fernández-Fierro, A. A., Rosero-Erazo, C. R., Beltrán-Dávalos, A. A., & Echeverría-Guadalupe, M. M. (2020). Caracterización y dinámica de la cobertura de suelo mediante Teledetección: caso de estudio volcán Tungurahua, Ecuador. *Dominio De Las Ciencias*, 6(2), pp. 906–938. <https://doi.org/10.23857/dc.v6i2.1201>

- Fleiss, J. L., Levin, B., & Paik, M. C. (1981). The measurement of interrater agreement. *Statistical methods for rates and proportions*, 2(212-236), 22-23.
- Foody, GM (2020). Explicar la inadecuación del coeficiente kappa en la evaluación y comparación de la precisión de mapas temáticos obtenidos mediante clasificación de imágenes. *Teledetección del medio ambiente*, 239, 111630. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111630>.
- Gaitan, J., Ciano, N., Oliva, G., Bran, D., Butti, L., Cariac, G., Caruso, C., Opazo, W., Ferrante, D., Echevarria, D., Buono, G., Fantozzi, A., Guirado, E., & Maestre, F. (2021). La variación temporal del índice NDVI predice los cambios temporales de la cobertura vegetal en las tierras secas de la Patagonia Argentina: *Ecosistemas*, 30(3), 2229. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2229>
- Gallardo-Cruz, J. A., Peralta-Carreta, C., Solórzano, J. V., Fernández-Montes de Oca, A. I., Nava, L. F., Kauffer, E., & Carabias, J. (2021). Deforestation and trends of change in protected areas of the Usumacinta River basin (2000–2018), Mexico and Guatemala. *Regional Environmental Change*. <https://doi.org/10.1007/s10113-021-01833-8>
- Gallardo-Cruz, J.A., Fernández-Montes de Oca, & A., Rives, C. (2019). Detección de amenazas y oportunidades para la conservación en la cuenca baja del Usumacinta a partir de técnicas de percepción remota. *Ecosistemas*, 28(2): 82-99. <https://doi.: 10.7818/ECOS.1611>
- García Mora, T. J., & Mas, J. F. (2008). Comparación de metodologías para el mapeo de la cobertura y uso del suelo en el sureste de México. *Investigaciones geográficas* (67), 7-19.
- García, A.E. (1988). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, UNAM, México, 217 p.
- Garg, V., Aggarwal, S. P., Gupta, P. K., Nikam, B. R., Thakur, P. K., Srivastav, S. K., & Senthil Kumar, A. (2017). Assessment of land use land cover change impact on hydrological regime of a basin. *Environmental Earth Sciences*, 76, 635. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6976-z>
- Govender, M., Chetty, K., Naiken, V., & Bulcock, H. (2008). A comparison of satellite hyperspectral and multispectral remote sensing imagery for improved classification and mapping of vegetation. *Water sa*, 34(2), 147-154. <https://doi:10.4314/wsa.v34i2.183634>
- Guzmán, R., Bezada, M., & Rodríguez-Santalla, I. (2023). Mapeo de la cobertura del suelo utilizando datos de teledetección en la llanura aluvial del río Apure (Venezuela). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 49 (1), 113–137. <https://doi.org/10.18172/cig.5607>  
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1002.4046>
- INEGI. 2012. Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0). Modelo de elevación, 15 metros. <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continuoelevaciones.aspx>
- INEGI. 2013. Conjunto Nacional de Uso del Suelo y Vegetación a escala 1:250,000, Seria VII, DGG-INEGI, México.
- Jiménez, AA, Vilchez, FF, González, ON, & Flores, SMM (2018). Analysis of the Land Use and Cover Changes in the Metropolitan Area of Tepic-Xalisco (1973–2015) through Landsat Images. *Sustainability*, 10 (6), 1860 <https://doi.org/10.3390/su10061860>
- Kassahun, M., Hundera, K. y Senbeta, F. (2024). Analysis of land use/ land cover changes and landscape fragmentation in the Baro-Akobo Basin, Southwestern Ethiopia. *Heliyon*, 10 (7), e28378. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28378>
- Kauffer, Edith. (2021). Hidroextractivismo en la cuenca del Usumacinta: entre dinámicas transfronterizas y diferenciaciones fronterizas. *Trace* (México, DF) (80), 171-199. Epub 11 de octubre de 2021. <https://doi.org/10.22134/trace.80.2021.792>
- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). An application of hierarchical kappa-type statistics in the assessment of majority agreement among multiple observers. *Biometrics*, 363-374. <https://doi.org/10.2307/2529465>
- Langford, M., & Bell, W. (1997). Land cover mapping in a tropical hillsides environment: A case study in the Cauca region of Colombia. *International Journal of Remote Sensing*, 18(6), 1289–1306. <https://doi.org/10.1080/014311697218421>

- Lemenkova, P. (2021). Evaluating land cover types from Landsat TM using SAGA GIS for vegetation mapping based on ISODATA and K-means clustering. *Acta Agriculturae Serbica*, 26 (56), 159-165. <https://doi:10.5937/AASer2152159L>
- Lemenkova, P. (2021). SAGA GIS for Computing Multispectral Vegetation Indices by Landsat TM for Mapping Vegetation Greenness. *Contemporary Agriculture*, 70 (1-2) 67-75. <https://doi.org/10.2478/contagri-2021-0011>
- López, L. D., & Saavedra, G. A. (2023). Detailed Land Cover and Land Use Mapping, A New Approach: Case Study, Usumacinta Watershed, Mexico. *European Journal of Applied Sciences*, 1(1). 408-418 <https://doi.org/10.14738/aivp.111.12457>
- Ma, Z., Liu, Z., Zhao, Y., Zhang, L., Liu, D., Ren, T., & Li, S. (2020). Un método de clasificación de cultivos no supervisado basado en binning isométrico de componentes principales. *ISPRS International Journal of Geo-Information* <https://doi.org/10.3390/ijgi9110648>
- Makandar, A., & Kaman, S. (2021). Land use Land Cover Study of Sentinel-2A and Landsat-5 Images using NDVI and Supervised Classification Techniques. *explorer*, <https://doi:10.21917/ijivp.2021.0365>
- March-Mifsut, I., & Castro, M. (2010). La Cuenca del Río Usumacinta: Perfil y perspectivas para su conservación y desarrollo sustentable. En H. Cotler Ávalos (Ed.), *Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización* (pp. 193–197). México D.F.: SEMARNAT, INE, IAP. <https://agua.org.mx/biblioteca/las-cuencas-hidrograficas-demexico-diagnostico-y-priorizacion>
- Maselli, F., C. Conese, L. Petkiv and R. Resti (1992), "Inclusion of prior probabilities derived from a nonparametric process into the maximum likelihood classifier", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 58, pp. 201–207.
- Melesse, A. M., & Jordan, J. D. (2002). A comparison of fuzzy vs. augmented-ISODATA classification algorithms for cloud-shadow discrimination from Landsat images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68(9), 905-912.
- Meave, J. A., Gallardo-Cruz, J. A., Hernández, C. A. M., Martínez-Camilo, R., Pérez, M. E. V., & Carabias, J. (2022). Tipos de vegetación de la cuenca del río Usumacinta. *Universidad Iberoamericana AC*.
- Mengqi Duan, Canción Xiangyun, Zengqiang li, Xiaoguang Zhang, Xiaodong Ding, Dejie Cui 2024 Identifying soil groups and selecting a high-accuracy classification method based on multi-textural features with optimal window sizes using remote sensing images. *Ecological Informatics* Vol. 81 <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102563>
- Mohammed, N. Z., Ghazi, A., & Mustafa, H. E. (2013). Positional accuracy testing of Google Earth. *International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering*, 4(6), 6-9. ISSN: 2045-7057
- Mulatu, K., Hundera, K., & Senbeta, F. (2024). Analysis of land use/land cover changes and landscape fragmentation in the Baro-Akobo Basin, Southwestern Ethiopia. *Heliyon*, 10 (7). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28378>
- Nay J., Burchfield E. & Gilligan J. (2017) A machine-learning approach to forecasting remotely sensed vegetation health. *International Journal of Remote Sensing*, 39(6), 1800-1816, <https://doi:10.1080/01431161.2017.1410296>
- Olokeogun, O. S., Iyiola, K., & Iyiola, O. F. (2014). Application of remote sensing and GIS in land use/land cover mapping and change detection in Shasha Forest reserve, Nigeria. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40, 613-616.
- Orjuela-Cañón, A. D., Figueroa-García, J. C., & Arias-Londoño, J. D. (Eds.). (2019). *Applications of Computational Intelligence. Communications in Computer and Information Science*. <https://doi:10.1007/978-3-030-36211-9>
- Padilla-Romero, A., & Hernández-Juárez, M. (2023). Cambio de uso de suelo por la construcción del NAICM en Texcoco, Estado de México. *Terra Latinoamericana*, 41, 1-15. e1608. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1608>
- Palacio-Prieto, J. L., & Luna-González, L. (1996). Improving spectral results in a GTS context. *International Journal of Remote Sensing*, 2201–2209. <https://doi.org/10.1080/01431169608948766>
- Palaniswami, C., Upadhyay, A. K., & Maheswarappa, H. P. (2006). Spectral mixture analysis for subpixel classification of coconut. *Current Science*, 1706-1711 <http://www.jstor.org/stable/24094026>

- Palma-López, D. J., Cisneros, D. J., Moreno, C. E., & Rincón-Ramírez, J. A. (2007). Suelos de Tabasco: su uso y manejo sustentable. Colegio de Postgraduados-ISPROTAB-FUPROTAB. Villahermosa, Tabasco, México, 195.
- Peralta-Carreta, C., Gallardo-Cruz, J. A., Solórzano, J. V., & Hernández-Gómez, M. (2019). Clasificación del uso de suelo y vegetación en áreas de pérdida de cobertura arbórea (2000–2016) en la cuenca del río Usumacinta. *Madera y Bosques*, 25 (3), e2531779 <http://doi.org/10.21829/myb.2019.2531779>
- Perumal, K., & Bhaskaran, R. (2010). Supervised classification performance of multispectral images.
- Peters, A. J., Walter-Shea, E. A., Ji, L., Vina, A., Hayes, M., & Svoboda, M. D. (2002). Drought monitoring with NDVI-based standardized vegetation index. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 68(1), 71-75. ISSN 0099-1112
- Pineda-Pastrana, O. (2011). Análisis de cambio de uso de suelo mediante percepción remota en el municipio de Valle de Santiago (tesis de maestría). Centro de Investigación en Geografía y Geomática Ing. Jorge L. Tamayo, A. C., México, DF, México.
- Qiu, S., Zhu, Z., Olofsson, P., Woodcock, C. E., & Jin, S. (2023). Evaluation of Landsat image compositing algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 285, 113375. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113375>
- R V, A M, S V, R P (2020) Unsupervised ISODATA algorithm classification used in the landsat image for predicting the expansion of Salem urban, Tamil Nadu. *Indian Journal of Science and Technology* 13(16): 1619-1629. <https://doi.org/10.17485/IJST/v13i16.271>
- Ramírez-García, A. R., Zavala-Cruz, J., Rincón-Ramírez, J. A., Guerrero-Peña, A., García López, E., Sánchez-Hernández, R., ... Ortiz-Pérez, M. A. (2022). Cambio de uso agrícola y vegetación (1947-2019) en la región de Los Ríos, Tabasco, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 28 (3), 465-481. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2022.01.001>
- Reuelta-Acosta, J. D., Garrido-Melendez, J., Escobedo-Trujillo, B. A., & Alcalá, G. (2023). LULC Evolution of Southeast Mexico Based on Geographical Information Systems and Remote Sensing. In *Congress on Research, Development, and Innovation in Renewable Energies: Selected Papers from CIDiER 2022* (pp. 89-106). Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-26813-7\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-031-26813-7_6)
- Reynolds, J.F., Stafford Smith, D.M., Lambin, E.F., Turner, B.L., II, Mortimore, M., Batterbury, S.P.J. 2007. Global desertification: Building a science for dryland development. *Science* 316, 847-851. <https://doi.org/10.1126/science.1131634>
- Reynoso Santos, Roberto, Valdez Lazalde, José René, Escalona Maurice, Miguel Jorge, & de los Santos Posadas, Héctor Manuel. (2015). Análisis de la dinámica del uso del suelo de la cuenca Metztlán en Hidalgo, México. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 36 (3), 102-111. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1680-03382015000300008&lng=es&tlng=pt](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382015000300008&lng=es&tlng=pt).
- Richards, J.A., Jia, X., 2006. *Remote Sensing Digital Image Analysis-Hardback*. Springer, Berlin/Heidelberg.
- Richards, JA (2022). Técnicas de clasificación supervisada. En: *Análisis de imágenes digitales mediante teledetección*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-82327-6\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-82327-6_8)
- Rodríguez-Valero, M.I., & Alonso-Sarria, F. (2021). Obtención de cartografías de usos y coberturas del suelo de la demarcación hidrográfica del Segura para el periodo 1986-2019, empleando teledetección y clasificación digital de imágenes. *Papeles de Geografía*, 67, pp. 45-65. <https://doi.org/10.6018/geografia.472241>
- Rullán-Silva, CD, Gama-Campillo, LM, Galindo-Alcántara, A, & Olthoff, AE. (2011). Clasificación no supervisada de la cobertura de suelo de la región Sierra de Tabasco mediante imágenes LANDSAT ETM+. *Universidad y ciencia*. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0186-29792011000100003&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-29792011000100003&lng=es&tlng=es).
- 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(04), 611. <https://doi.org/10.4236/ijg.2017.84033>
- Rzedowsky, J. (1998). *Vegetación potencial de México, modificado de CONABIO, 2008 Ciudad de México*.

- Saco, P. M., Moreno-de las Heras, M., Keesstra, S., Baartman, J., Yetemen, O., & Rodríguez, J. F. (2018). Vegetation and soil degradation in drylands: non linear feedbacks and early warning signals. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 5, 67-72. doi.org/10.1016/j.coesh.2018.06.001
- Sahebjalal, E., & Dashtekian, K. (2013). Analysis of land use-land covers changes using normalized difference vegetation index (NDVI) differencing and classification methods. *African Journal of Agricultural Research*, 8(37), 4614-4622. https://doi:10.5897/AJAR11.1825
- Sánchez-Hernández, Rufo, Mendoza-Palacios Juan Enrique, De la Cruz Reyes Juan de Dios, Mendoza Martínez Julio César & Ramos-Reyes, Rodimiro. (2013). Mapa de erosión potencial en la cuenca hidrológica Grijalva-Usumacinta México mediante el uso de SIG. *Universidad y ciencia*, 29 (2), 153-161.
- SERNAPAM 2013. Programa de Ordenamiento Ecológico del Estado de Tabasco. Secretaría de Recursos Naturales y Protección Ambiental. Gobierno del Estado de Tabasco. D.F. México. https://tabasco.gob.mx/sites/default/files/sites/default/files/public\_files/POET2013.pdf.
- Shalaby A, Tateishi R. Remote sensing and GIS for mapping and monitoring land cover and land-use changes in the Northwestern coastal zone of Egypt. *Applied Geography*. 2007 ;27(1):28–41. https://doi:10.1016/j.apgeog.2006.09.004.
- Sisodia, P. S., Tiwari, V., & Kumar, A. (2014, May). Analysis of supervised maximum likelihood classification for remote sensing image. In *International conference on recent advances and innovations in engineering (ICRAIE-2014)* (pp. 1-4). IEEE. https://doi:10.1109/ICRAIE.2014.6909319.
- Sun, J., & Qin, X. (2016). Precipitation and temperature regulate the seasonal changes of NDVI across the Tibetan Plateau. *Environmental Earth Sciences*, 75(4). https://doi:10.1007/s12665-015-5177-x
- Tobar-Díaz, R., Gao, Y., Mas, J. F., & Cambrón-Sandoval, V. H. (2023). Clasificación de uso y cobertura del suelo a través de algoritmos de aprendizaje automático: revisión bibliográfica. *Revista de Teledetección* (62), 1-19. https://doi.org/10.4995/raet.2023.19014
- Topaloğlu, R. H., Sertel, E., & Musaoğlu, N. (2016). Assessment of classification accuracies of sentinel-2 and landsat-8 data for land cover / use mapping. *The International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, XLI-B8, 1055–1059. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B8-1055-2016
- Trujillo Jiménez, Magda Alexandra; Liberoff, Ana-Laura; Pessacg, Natalia Liz; Pacheco, Cristian; Diaz, Lucas; SatRed: New classification land use/land cover model based on multi-spectral satellite images and neural networks applied to a semiarid valley of Patagonia; Elsevier Science; *Remote Sensing Applications: Society and Environment*; 26; 4-2022; 1-17 https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100703
- Tudela, F. 1989. La modernización forzada del trópico: el caso de Tabasco, Proyecto Integrado del Golfo. El Colegio de México, Federación Internacional de Institutos de Estudios Avanzados, Instituto de Investigaciones de las Naciones Unidas para el Desarrollo Social, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. D.F. México, México.
- Tziolas, N., Tsakiridis, N., Ogen, Y., Kalopesa, E., Ben-Dor, E., Theocharis, J. y Zalidis, G. (2020). Una metodología integrada que utiliza bibliotecas espectrales de suelo abiertas y datos de observación de la Tierra para estimaciones de carbono orgánico del suelo en apoyo de los ODS relacionados con el suelo. *Teledetección del medio ambiente*, 244, 111793.
- Vaca, R. A., Golicher, D. J., Rodiles-Hernández, R., Castillo-Santiago, M. Á., Bejarano, M., & Navarrete-Gutiérrez, D. A. (2019). Drivers of deforestation in the basin of the Usumacinta River: Inference on process from pattern analysis using generalised additive models. *Plos One*, 14 (9). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0228328
- Vega Guzmán, Álvaro, López-García, José, & Manzo Delgado, Lilia de Lourdes. (2008). Análisis espectral y visual de vegetación y uso del suelo con imágenes Landsat ETM+ con apoyo de fotografías aéreas digitales en el Corredor Biológico Chichinautzin, Morelos, México. *Investigaciones geográficas* (67), 59-75. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\_arttext&pid=S0188-46112008000300005&lng=es&tlng=es

- Wang, B.; Yao, Y. Mountain Vegetation Classification Method Based on Multi-Channel Semantic Segmentation Model. 2024, *Remote Sens.* 16, 256. <https://doi.org/10.3390/rs16020256>
- Ward, J. H. (1963). Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function. *Journal of the American Statistical Association*, 58(301), 236–244. <https://doi.org/10.1080/01621459.1963.10500845>
- Wu, C., & Murray, A. T. (2003). Estimating impervious surface distribution by spectral mixture analysis. *Remote sensing of Environment*, 84(4), 493-505. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00136-0](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00136-0)
- Yacouba, D., Guangdao, H., & Xingping, W. (2009). Assessment of land use cover changes using NDVI and DEM in Puer and Simao counties, Yunnan Province, China. *World rural observations*, 1(2), 1-11.
- Yang, H.X., Zhang, X.K., Xu, M.Y., Shao, S., Wang, X., Liu, W.Q., Wu, D.Q., Ma, Y.Y., Bao, Y.L., Zhang, X.L., Liu, H.J., 2020. Hyper-temporal remote sensing data in bare soil period and terrain attributes for digital soil mapping in the Black soil regions of China. *Catena* 184, 104259. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104259>
- Yasin HE, & Kornel, E. C. (2024). Evaluación de la clasificación de imágenes de satélite: exploración de métodos y técnicas. *IntechAbierto*. <https://doi: 10.5772/intechopen.1003196>
- Zubaidi, E. A., & Al Khafaji, R. (2024). Unsupervised Classification of Landsat-8 Satellite Imagery-Based on ISO Clustering. *Wasit Journal of Computer and Mathematics Science*, 3(1), 40-53. <https://doi.org/10.31185/wjcms.212>
- Zhang, X., Wang, D., Hao, H., Zhang, F., & Hu, Y. (2017). Effects of Land Use/Cover Changes and Urban Forest Configuration on Urban Heat Islands in a Loess Hilly Region: Case Study Based on Yan'an City, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14 (8), 840. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph14080840>
- Zhang, X., Yan, G., Li, Q., Li, ZL, Wan, H. y Guo, Z. (2006). Evaluación de la fracción de cobertura vegetal basada en el modelo de corrección de escala espacial NDVI. *Revista Internacional de Percepción Remota*, 27 (24), 5359-5372. <https://doi:10.1080/01431160600658107>
- Zhang, X., Zhao, T., Xu, H., Liu, W., Wang, J., Chen, X., and Liu, L. (2023). GLC\_FCS30D: The first global 30-m land-cover dynamic monitoring product with a fine classification system from 1985 to 2022 using dense time-series Landsat imagery and continuous change-detection method. *Earth System Science Data Discussions*, 1-32. <https://doi.org/10.5194/essd-2023-3201>.
- Zhao, Q., Liu, S., Deng, L., Dong, S., Yang, Z. y Yang, J. (2012). Cambio de paisaje y alteración hidrológica asociados con la construcción de presas. *Revista Internacional de Geoinformación y Observación Aplicada de la Tierra*, 16, 17-26. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.11.009>

**CAPITULO III**  
**CAMBIOS EN USOS DEL SUELO Y VEGETACIÓN EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO**  
**USUMACINTA, MÉXICO**

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México

**Nombre del artículo:** Cambios en usos del suelo y vegetación en la Cuenca baja del Río Usumacinta, México

**Autores:** Héctor Javier Megia-Vera<sup>1,2</sup>, Adalberto Galindo Alcantara<sup>1</sup>, Rodimiro Ramos-Reyes<sup>3</sup>, Miguel Ángel Palomeque-De la Cruz<sup>1</sup>. Candelario Peralta-Carreta<sup>1,4</sup>, Ojilve Ramón Medrano-Pérez.

**Resumen:** La Cuenca Baja del Usumacinta se distingue por su biodiversidad. Sin embargo, las actividades agropecuarias, forestales e industriales han modificado su territorio. Estudiar su dinámica espacial y temporal aporta información clave sobre los efectos de las actividades humanas y los cambios ambientales. Evaluar los cambios en los usos del suelo y la vegetación en la Cuenca Baja del Río Usumacinta, México. Se clasificaron imágenes de uso del suelo y cobertura vegetal: 2000 y 2021. Posteriormente, se realizó un análisis espacial utilizando *Land Change Modeler for Ecological Sustainability* y se calcularon las tasas de cambio. Entre 2000 y 2021 se detectó la deforestación de 265,778 ha de bosque tropical perennifolio, con una tasa de cambio negativa de 4.05%, ante el aumento de 242,890 ha de uso agropecuario, y la presencia de 58,564 ha de plantaciones forestales y 33,465 ha de palma de aceite. Esta transformación está marcada por decisiones políticas que ignoran la funcionalidad de los ecosistemas del trópico húmedo. Esta información es relevante para fundamentar un modelo de ordenamiento ecológico en la Cuenca Baja del Usumacinta, que permita mitigar la pérdida de cobertura forestal y promover su rehabilitación con el fin de restablecer los servicios ecosistémicos.

**Palabras clave:** Uso del suelo, imágenes, coberturas, tasa de cambio

**Institución de adscripción de cada autor:** <sup>1</sup>División Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), Carretera Villahermosa-Cárdenas km 0.5 s/n, entronque a Bosques de Saloya. 86150 Villahermosa, Tabasco, México

<sup>2</sup>Tecnológico Nacional de México Campus Villa La Venta; (HJMV), La Venta, Huimanguillo, Tabasco, México.

<sup>3</sup>El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Unidad Villahermosa. Carretera a Reforma km 15.5 s/n. Ra. Guineo 2da. Sección, Centro. 86280 Villahermosa, Tabasco, México

<sup>4</sup>Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad, A.C. (CCGS), Villahermosa, Tabasco, México.

<sup>5</sup>SECIHTI-Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Misantla (ITSM), Misantla, Veracruz, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5445-1136>

**Enviado a y/o publicado en:** Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente

**Nombre de la Editorial:** Universidad Autónoma Chapingo

**Fecha de envío:** noviembre 2025

1 Héctor Javier Megia-Vera<sup>1,2</sup> (<https://orcid.org/0000-0001-6499-5404>), Adalberto Galindo  
 2 Alcantara<sup>1</sup> (<https://orcid.org/0000-0001-9628-982X>), Rodimiro Ramos-Reyes<sup>3</sup>, Miguel  
 3 Ángel Palomeque-De la Cruz<sup>1</sup> (<https://orcid.org/0000-0002-0407-8476>)<sup>1\*</sup>.  
 4 (<https://orcid.org/0000-0003-3957-8160>), Candelario Peralta-Carreta<sup>1,4</sup>  
 5 (<https://orcid.org/0000-0002-5747-9791>), Ojilve Ramón Medrano-Pérez  
 6 (<https://orcid.org/0000-0002-5445-1136>)<sup>5</sup>.

7  
 8 <sup>1</sup>División Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco  
 9 (UJAT). Carretera Villahermosa-Cárdenas km 0.5 s/n, entronque a Bosques de Saloya.  
 10 86150 Villahermosa, Tabasco, México

11 <sup>2</sup>Tecnológico Nacional de México Campus Villa La Venta; (HJMV), La Venta,  
 12 Huimanguillo, Tabasco, México.

13 <sup>3</sup>El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Unidad Villahermosa. Carretera a Reforma  
 14 km 15.5 s/n. Ra. Guineo 2da. Sección, Centro. 86280 Villahermosa, Tabasco, México

15 <sup>4</sup>Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad, A.C. (CCGS), Villahermosa, Tabasco,  
 16 México.

17 <sup>5</sup>SECIHTI-Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Misantla  
 18 (ITSM), Misantla, Veracruz, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5445-1136>

19  
 20 \*Autor para correspondencia: [miguel.palomeque@ujat.mx](mailto:miguel.palomeque@ujat.mx), tel. 9935140648.

21 **Cambios en usos del suelo y vegetación en la Cuenca baja del Río Usumacinta,**  
 22 **México**

23 **Resumen**

24 **Introducción.** La Cuenca Baja del Usumacinta se distingue por su biodiversidad. Sin  
 25 embargo, las actividades agropecuarias, forestales e industriales han modificado su  
 26 territorio. Estudiar su dinámica espacial y temporal aporta información clave sobre los  
 27 efectos de las actividades humanas y los cambios ambientales.

28 **Objetivos.** Evaluar los cambios en los usos del suelo y la vegetación en la Cuenca Baja  
 29 del Río Usumacinta, México.

30 **Materiales y métodos.** Se clasificaron imágenes de uso del suelo y cobertura vegetal:  
31 2000 y 2021. Posteriormente, se realizó un análisis espacial utilizando *Land Change*  
32 *Modeler for Ecological Sustainability* y se calcularon las tasas de cambio.

33 **Resultados.** Entre 2000 y 2021 se detectó la deforestación de 265,778 ha de bosque  
34 tropical perennifolio, con una tasa de cambio negativa de 4.05%, ante el aumento de  
35 242,890 ha de uso agropecuario, y la presencia de 58,564 ha de plantaciones forestales  
36 y 33,465 ha de palma de aceite. Esta transformación está marcada por decisiones  
37 políticas que ignoran la funcionalidad de los ecosistemas del trópico húmedo.

38 **Conclusiones.** Esta información es relevante para fundamentar un modelo de  
39 ordenamiento ecológico en la Cuenca Baja del Usumacinta, que permita mitigar la  
40 pérdida de cobertura forestal y promover su rehabilitación con el fin de restablecer los  
41 servicios ecosistémicos.

## 42 **Introducción.**

43 La pérdida de los ecosistemas en las cuencas hidrográficas es un grave problema  
44 que afecta a la biodiversidad, el almacenamiento de carbono y los medios de vida locales  
45 (Altamirano *et al.*, 2020; Giam, 2017; Tyukavina *et al.*, 2015); además, de los sistemas  
46 hídricos y climáticos en el mundo (Chen *et al.*, 2025; Ellison *et al.*, 2024; Jones *et al.*,  
47 2020; Senior *et al.*, 2019). La dinámica de los ecosistemas se ve intensificada por  
48 factores antrópicos como la adquisición de tierras a gran escala (Davis *et al.*, 2020), la  
49 expansión agrícola (Sloan & Sayer, 2015) y la alta demanda de *commodities* del  
50 comercio internacional (Hoang & Kanemoto, 2021).

51 En el sureste de México, diversos estudios han abordado la dinámica espacial y  
52 temporal de las coberturas selváticas, aportando información clave sobre los efectos de  
53 las actividades humanas y los cambios ambientales. Estrada-Loreto *et al.* (2013) se  
54 centran en los humedales de Balancán, Tabasco, utilizando imágenes Landsat para  
55 cuantificar los cambios en la cobertura debido a alteraciones hidrológicas y presiones  
56 antrópicas. En cambio, Gallardo-Cruz *et al.* (2019) emplean datos del *Global Forest*  
57 *Watch* (2000-2012) y observaciones *in situ* para estudiar la PCA y las zonas de deterioro  
58 en la Cuenca Baja del Río Usumacinta, así como para identificar áreas con potencial de  
59 conservación. Por su parte, en la Región de Los Ríos, Tabasco, Ramírez-García *et al.*

60 (2022) analizan la expansión agrícola entre 1947 y 2019 a partir de imágenes Landsat,  
61 encontrando que la pérdida de vegetación natural se relaciona con el crecimiento de los  
62 asentamientos humanos y la expansión agrícola sin criterios ambientales adecuados.

63 Palomeque-de la Cruz *et al.* (2025) utilizan el modelo *Land Change Modeler for*  
64 *Ecological Sustainability* para analizar el cambio de uso del suelo en Tenosique,  
65 Tabasco, identificando la pérdida de selvas debido a actividades antrópicas como la  
66 construcción de infraestructuras y las prácticas agrícolas, pecuarias y agroindustriales.  
67 No obstante, aunque los estudios previos han proporcionado información esencial para  
68 el análisis y el conocimiento sobre la región, para lograr un análisis más preciso es  
69 fundamental emplear metodologías de análisis de imagen, comprobación en campo y  
70 modelación de la dinámica del territorio de Tabasco. En este sentido, Megia-Vera *et al.*  
71 (2025) realizaron un análisis detallado de la cobertura y el uso de suelo en la Cuenca  
72 Baja del Río Usumacinta, logrando discriminar distintos tipos de cobertura y una  
73 clasificación supervisada, información base para el estudio de los cambios en usos del  
74 suelo.

### 75 **Objetivo.**

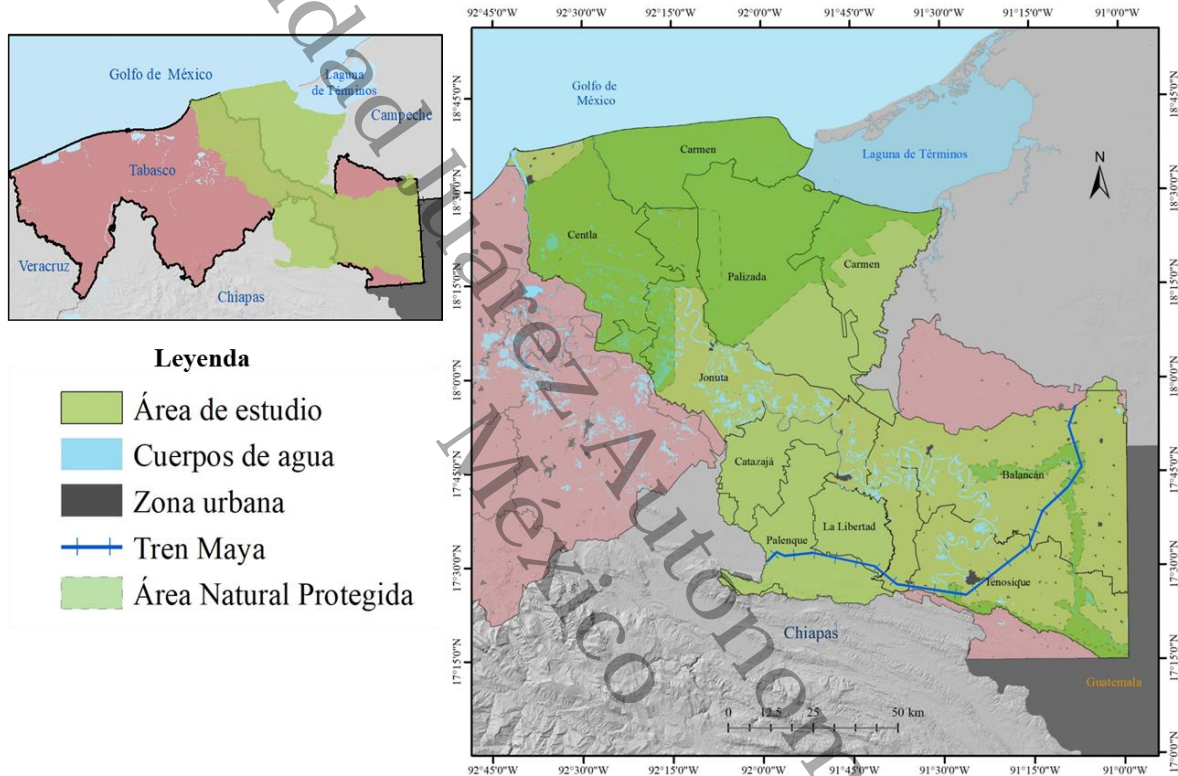
76 Estudiar los cambios en usos del suelo y vegetación en la Cuenca baja del Río  
77 Usumacinta, México. Para ello, se planteó un análisis espacial con *Land Change Modeler*  
78 *for ecological sustainability*; esta información es relevante para sustentar modelos de  
79 ordenamiento ecológico que permitan mitigar su pérdida o buscar su rehabilitación para  
80 restablecer sus servicios y beneficios ambientales.

### 81 **Materiales y métodos.**

#### 82 **Área de estudio**

83 El Río Usumacinta es el más largo y caudaloso de Mesoamérica con 1,100 km de  
84 longitud (Kauffer, 2021) y  $1,700 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  de caudal (March-Mifsut & Castro, 2010), el cual  
85 corre libremente con escasa intervención antrópica (Peralta-Carreta *et al.*, 2025). Este  
86 río pertenece a la cuenca transfronteriza del Río Usumacinta, al compartir una superficie  
87 hídrica de  $77,265 \text{ km}^2$  entre México, Guatemala y Belice. La cuenca baja del Usumacinta  
88 tiene una superficie total de  $14,291.75 \text{ km}^2$ . El área de estudio de este trabajo comprende  
89 solo la porción mexicana con una superficie de  $14,291.75 \text{ km}^2$ , distribuida entre los

90 estados de Chiapas (14.3%), Campeche (30.8%) y Tabasco (54.9%) antes de  
 91 desembocar en el Golfo de México (Gallardo-Cruz *et al.*, 2021) (Figura 1). La cuenca  
 92 baja destaca por su biodiversidad en las áreas naturales protegidas Cañón del  
 93 Usumacinta, Laguna de términos, reserva de la Biosfera de los Pantanos de Centla,  
 94 Wanha', por otra parte, las actividades agropecuarias, forestales y cultivos industriales  
 95 predominan en la zona de estudio (Ramírez-García *et al.*, 2022, Megia-Vera *et al.*, 2025).



96  
 97 **Figura 1.** Cuenca del Río Usumacinta en el Sureste de México

98 **Construcción de la base de datos**

99 A partir del conjunto de datos Landsat 7 y 9 Thematic Mapper (TM) del Servicio  
 100 Geológico de los Estados Unidos (USGS), <https://www.usgs.gov>, se obtuvieron dos  
 101 imágenes compuestas para el año 2000 y 2021 procesadas en *Google Earth Engine*  
 102 (Gorelick *et al.*, 2017).

104 **Clasificación de imágenes de uso de suelo y vegetación del 2000 y 2021**

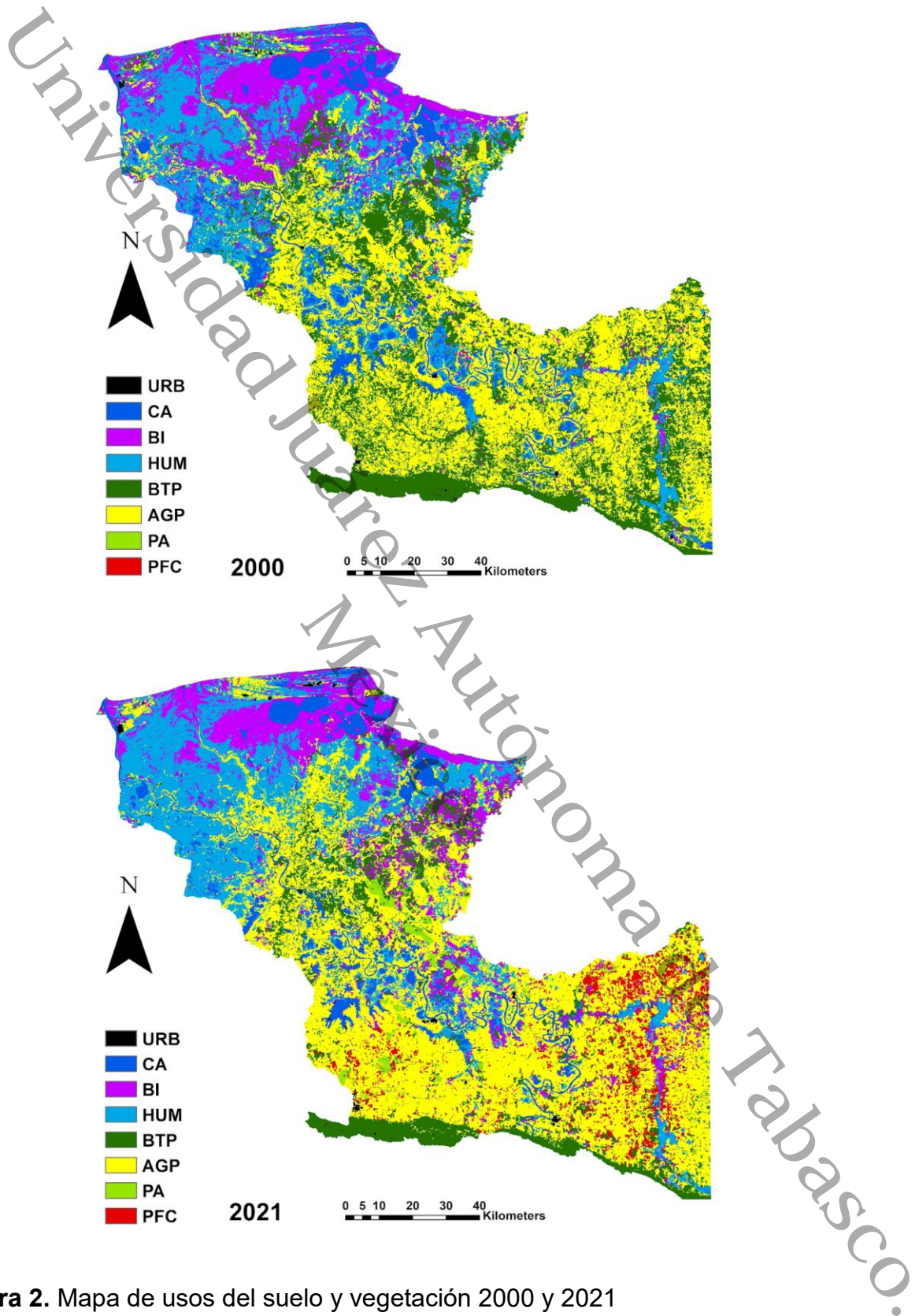
105 Se eligió la clasificación supervisada (CS) utilizando el algoritmo de Máxima  
 106 Verosimilitud (*MLC*, por sus siglas en inglés) al ser el método más utilizado entre los

107 enfoques de clasificación paramétrica (Maselli, Conese, Petkov & Resti,1992;  
 108 Sisodia, Tiwari & Tiwari, 2014).

109

110 **Tabla 1.** Descripción de los usos del suelo y tipos de vegetación

<b>Coberturas y usos de suelo</b>	<b>Descripción</b>	111
		112
Plantaciones forestales comerciales	Plantaciones forestales de caoba, teca, melina y hule	113
Palma de aceite	Establecimiento de palma de aceite	114
Agropecuario	Sistemas de agropecuario, pastizal cultivado, cultivos agrícolas, ganadería intensiva	115
Urbano	Asentamientos humanos e Infraestructura carretera, ejidos, ciudades	
Cuerpo de agua	Sistemas estuarios, lagunas costeras, canales, cauces de ríos, excluyendo el Océano Pacífico y estanques de actividad acuícola	
Humedales	Pueden presentarse con o sin vegetación (vegetación hidrófila en asociación con la especie de <i>Quercus oleoides</i> , <i>Thali geniculata</i> , <i>typha latifolia</i> , <i>Haematoxylum campechianum</i> )	
Bosque inundado	Asociaciones de hidrófilas dominadas por especies de manglar ( <i>Laguncularia racemosa</i> , <i>Rhizophora mangle</i> , <i>Avicennia germinans</i> , <i>Pachira aquatica</i> ).	
Bosque tropical	Vegetación secundaria de selva baja y mediana subcaducifolia, asociaciones de arbustos y vegetación perturbada.	



116 **Figura 2.** Mapa de usos del suelo y vegetación 2000 y 2021

117

## 118 **Modelación del cambio de uso del suelo entre 2000 y 2021**

119 Para realizar el análisis espacial-temporal durante el periodo entre 2000 y 2021,  
120 se ejecutó el cruce de las imágenes raster usando el módulo *Land Change Modeler*  
121 (LCM) *for Ecological Sustainability* integrado en TerrSet liberaGIS® (Eastman, 2024). Se  
122 empleó el comando CrossTab para validar la matriz de probabilidad (Eastman, 2024). La  
123 sobreposición de las imágenes entre 2000 y 2021, generaron una matriz de probabilidad  
124 de cambio con estadístico Overall Kappa: 0.6790 que promedia a 1.0 y demuestra que  
125 los cruces de los dos periodos de tiempo son confiables para el análisis de cambio de  
126 uso del suelo del territorio (Eastman, 2024).

127 Los resultados incluyeron el resumen de las matrices que muestran la superficie  
128 de cada categoría, en la comparación con otras en términos de ganancias, pérdidas,  
129 cambios netos y transiciones.

130

### 131 **Tasa de cambio de uso del suelo.**

132 La tasa de cambio de uso del suelo indica de manera porcentual el cambio anual  
133 de la superficie de una categoría de uso al inicio de cada año de análisis (Palacio *et al.*,  
134 2004). Para su cálculo, se utilizaron las áreas de cada categoría de cobertura y uso de  
135 los periodos 2000 y 2021.

136

$$d = [(S2/S1)^{1/n-1}].100$$

137 Dónde:

138 S1, es el área cubierta por determinado uso del suelo al inicio del período

139 S2, es el área cubierta por determinado uso del suelo al final del periodo

140 T, es el número de años del periodo de análisis

141

## 142 **Resultados y discusión.**

### 143 **Uso de suelo y vegetación en el año 2000**

144 El Cuadro 2 y la Figura 2 muestran las superficies por uso de suelo y vegetación  
145 correspondientes al año 2000. En esta fecha, los cuerpos de agua y humedales  
146 representaban el 26.8% de la Cuenca Baja del Usumacinta. La presencia de estos

147 ecosistemas no resulta excepcional en la región, dado que gran parte de Tabasco está  
148 conformada por humedales asentados en la planicie baja (López-Jiménez, 2019).

149 Sobresale la Reserva de la Biosfera Wanka', compartida entre los municipios de  
150 Balancán y Tenosique, la cual constituye un espacio estratégico para la conservación de  
151 ecosistemas tropicales y la salvaguarda de una notable diversidad biológica (Peralta-  
152 Carreta *et al.*, 2025a). De igual forma, en el Noroeste se ubica la Reserva de la Biosfera  
153 Pantanos de Centla, reconocida como uno de los humedales más extensos e importantes  
154 de Mesoamérica. Ambas reservas cuentan con reconocimiento de la Convención  
155 Ramsar, lo que resalta su papel en la regulación hidrológica, el almacenamiento de  
156 carbono, la provisión de recursos naturales y la protección de especies endémicas y  
157 migratorias (Gallardo-Cruz *et al.*, 2019; Ramírez-García *et al.*, 2022).

158 En cuanto a la vegetación selvática, esta se encontraba representada por el  
159 bosque inundado (12.9%) y el bosque tropical perennifolio (25.6%). La Figura 2 permite  
160 observar que gran parte de estas coberturas se concentraba en las inmediaciones del  
161 Río San Pedro, dentro de los municipios de Balancán y Tenosique. Asimismo, destacan  
162 los macizos boscosos del Norte de Palenque, Chiapas, así como una fracción del Área  
163 de Protección de Flora y Fauna Cañón del Usumacinta, al Sur de Tenosique.

164 La vegetación selvática fue de gran relevancia florística, pues se distribuía  
165 ampliamente. Sin embargo, en la actualidad persisten únicamente remanentes de  
166 mediana extensión en los municipios de Balancán y Tenosique, donde predominan  
167 especies arbóreas, varias de ellas amenazadas o en peligro de extinción (Maldonado-  
168 Sánchez *et al.*, 2016; Vázquez-Negrín *et al.*, 2011). Hace cinco décadas, el desarrollo  
169 económico en Tabasco impulsó la deforestación de amplias coberturas de selva mediana  
170 de pukte (*Bucida buceras* L.) y selva baja de tinto (*Haematoxylum campechianum*), que  
171 fueron transformadas en pastizales para uso pecuario (Soares & García, 2017; Isaac-  
172 Márquez *et al.*, 2005). Según Ramírez-García *et al.* (2022), en 1947 la Región de los  
173 Ríos albergaba el 82,3% de cobertura selvática, destacando la selva alta perennifolia, la  
174 selva mediana subperennifolia y subcaducifolia en zonas serranas, mientras que en la  
175 planicie predominaba la selva baja inundable (61,5%).

176 El uso agropecuario representaba el 25,6% del territorio, mientras que el uso  
177 urbano apenas alcanzaba el 0,35%. Según Isaac-Márquez *et al.* (2005), hacia 2003 los

178 cultivos permanentes, promovidos por programas de fomento como PROCAMPO y  
179 Alianza para el Campo, fueron factores determinantes en el cambio de uso del suelo  
180 durante la década de 1990 y los primeros años del siglo XXI.

181 Durante las últimas dos décadas del siglo XX, la apertura de campos de cultivo  
182 especialmente para la caña de azúcar se realizó mediante el sistema de roza-tumba-  
183 quema. Esta práctica, sumada a los incendios forestales, contribuyó de manera  
184 significativa a la reducción de la cobertura vegetal remanente, afectando de forma  
185 especial a la selva tropical (Reyes-Grande, 2015; Ramírez-García *et al.*, 2023).

186

### 187 **Cambio de uso de suelo y vegetación durante 2000 y 2021**

188 El Cuadro 2 presenta las pérdidas y ganancias de superficie para el período 2000-  
189 2021, mientras que la Figura 3 muestra las transiciones entre las diferentes categorías  
190 de uso del suelo. Para 2021, los cuerpos de agua registraron una disminución de 27,467  
191 ha, ocupando el 6.47%. De acuerdo con la Figura 3, las transiciones 2000-2021 destacan  
192 que las pérdidas de cuerpos de agua fueron causadas principalmente por el crecimiento  
193 de 14,708 ha de humedales, seguido por el crecimiento de 6,816 ha de uso agropecuario  
194 y 4,441 ha de bosque inundable.

195 Opuesto a lo anterior, los humedales experimentaron un aumento significativo de  
196 136,831 ha, alcanzando el 21.7% del territorio. Sin embargo, también registraron  
197 pérdidas de 107,521 ha. Entre estas, destacan 5,672 ha transformadas en áreas  
198 agropecuarias, lo que evidencia la presión constante de este uso sobre los ecosistemas  
199 acuáticos. Asimismo, se registraron pérdidas de 39,155 ha para el crecimiento del  
200 bosque inundable y de 9,715 ha hacia bosque tropical perennifolio.

201 En las Cuencas Grijalva-Usumacinta, importantes coberturas de lagunas urbanas,  
202 costeras y pantanos han sido afectadas por la expansión agrícola, la construcción de  
203 carreteras, las actividades pecuarias, la infraestructura petrolera y el uso insostenible del  
204 agua por parte de la industria y las zonas residenciales, a pesar de ser fundamentales  
205 para la protección frente a ciclones e inundaciones, la recreación y el turismo, así como  
206 el sostenimiento de la biodiversidad y hábitat de especies residentes y migratorias  
207 (Ramos-Reyes & Palomeque-de la Cruz, 2023).

208 En la Cuenca del Usumacinta, la pérdida de humedales no solo responde a  
 209 procesos de deforestación de la selva tropical y a la expansión urbana, sino también a  
 210 políticas públicas, como la construcción de carreteras y la implementación del Plan  
 211 Balancán-Tenosique. Estas acciones, promovidas bajo el argumento del desarrollo  
 212 económico, han derivado en la fragmentación de los humedales y en el relleno de sus  
 213 áreas de inundación temporal, comprometiendo con ello la integridad ecológica y la  
 214 provisión de servicios ecosistémicos (Kolb & Galicia, 2012; Sánchez *et al.*, 2015).

215 **Tabla 2. Usos del suelo en la Cuenca Baja del Usumacinta, México**

Categorías	2000 (ha)	%	2021 (ha)	%	Perdidas (ha)	Ganancias (ha)	Cambio neto (ha)	Tasa de cambio (%)
<b>URB</b>	5,052	0.35	8,003	0.56	2,745	5,697	2,951	2.21
<b>CA</b>	109,511	7.66	92,439	6.47	27,467	10,394	-17,073	-0.80
<b>BI</b>	184,182	12.89	187,908	13.15	96,552	100,278	3,726	0.10
<b>HUM</b>	273,319	19.12	302,629	21.17	107,521	136,831	29,310	0.49
<b>BTP</b>	366,024	25.61	153,764	10.76	265,778	53,518	-	-4.05
<b>AGP</b>	491,154	34.36	592,469	41.45	141,574	242,890	101,316	0.90
<b>PA</b>	0	0.00	33,465	2.34	0	33,465	33,465	0.00
<b>PFC</b>	0	0.00	58,564	4.10	0	58,564	58,564	0.00

216  
 217 El bosque inundable registró un incremento de 100,278 ha (13.15%). No obstante,  
 218 el mayor impacto ambiental durante 21 años de análisis fue la deforestación del bosque  
 219 tropical perennifolio, que perdió 265,778 ha (10.8%) y presentó una alarmante tasa de  
 220 cambio negativa de 4.05%. Esta pérdida estuvo asociada principalmente al  
 221 establecimiento de 158,677 ha destinadas a uso agropecuario y 29,774 ha a plantaciones  
 222 forestales comerciales. Además, se identificaron transiciones de 39,461 ha hacia bosque  
 223 inundable y de 21,057 ha hacia humedales, lo que refleja una dinámica de sustitución  
 224 compleja y multifactorial (Tabla 2).

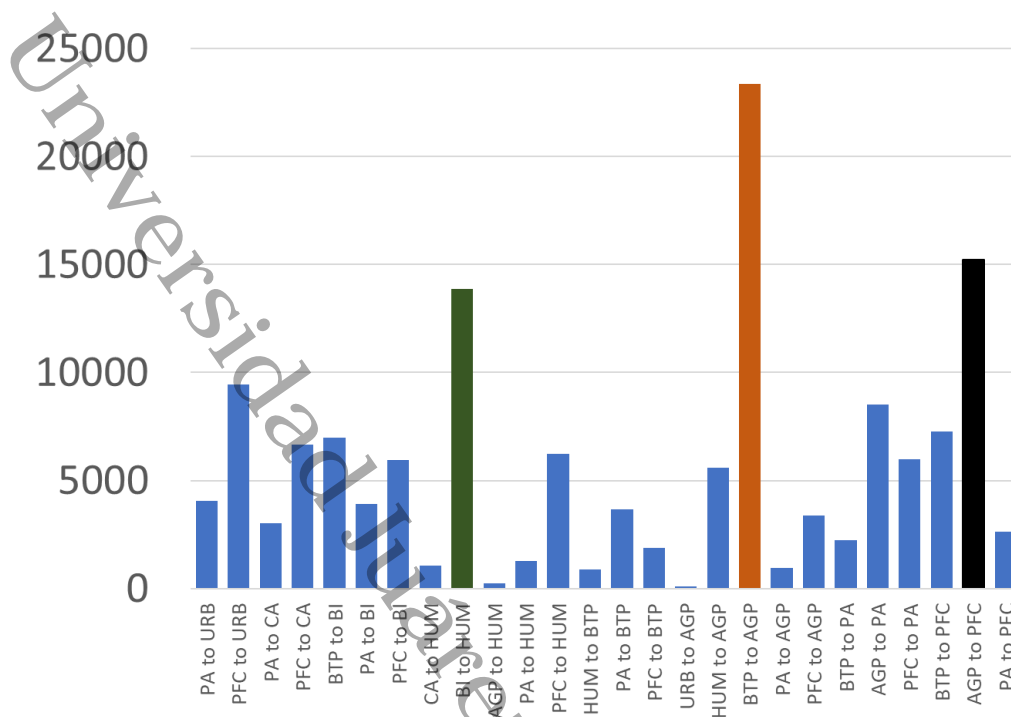
225 Los usos agropecuarios continuaron siendo dominantes, con una expansión de  
 226 242,890 ha (41.5%). No obstante, también registraron pérdidas de 141,574 ha, que

227 dieron lugar a procesos de sustitución hacia otras coberturas: 34,434 ha correspondieron  
228 a bosque tropical perennifolio en recuperación, 16,975 ha a bosque inundable y 42,822  
229 ha a humedales. A estos cambios se sumaron transformaciones asociadas a decisiones  
230 políticas y económicas, entre ellas el establecimiento de 26,422 ha de plantaciones  
231 forestales comerciales y 15,997 ha destinadas al cultivo de palma de aceite.

232 En este periodo surgieron actividades destinadas al cultivo de palma de aceite  
233 que alcanzaron 33,642 ha (2.34%). El cultivo palma de aceite es una actividad  
234 agroindustrial que ha crecido en superficie y seguirá creciendo en México (Hernández-  
235 Rojas *et al.*, 2018), así como en la Región de América Latina que ocupa el segundo lugar  
236 en producción de frutos de esta especie después de Asia, este cultivo ha sido promovido  
237 en las fronteras como una forma de modernizar las zonas rurales (Srisunthon &  
238 Chawchai, 2020; Castellanos-Navarrete *et al.*, 2021).

239 Las plantaciones forestales comerciales alcanzaron una superficie de 58,564 ha  
240 (4.10%). El incremento de estas coberturas, junto con la expansión agrícola, se relaciona  
241 estrechamente con el impulso otorgado a esta actividad a partir de 2019 mediante el  
242 programa “Sembrando Vida” que combinó una serie de sistemas y tecnologías para el  
243 uso de la tierra en las que se combinan árboles con cultivos agrícolas y/o pastos, en  
244 función del tiempo y el espacio para incrementar y optimizar la producción en forma  
245 sostenida (Ramírez-García *et al.*, 2023; San-Pallo *et al.*, 2019).

246



247

248 **Figura 3.** Principales transiciones entre 2000 y 2021

249

250 La deforestación en la Cuenca Baja del Usumacinta está marcada por decisiones  
 251 políticas que ignoran la funcionalidad de los ecosistemas del trópico húmedo (Kolb &  
 252 Galicia, 2013). Los patrones de cambio de uso del suelo continuarán por las actuales  
 253 políticas productivas, y se suma el posible impacto ambiental de la construcción y puesta  
 254 en marcha del Tren Maya en Balancán-Tenochtitlán (Palomeque-de la Cruz *et al.*, 2025).

255 En México, el ordenamiento ecológico no ha logrado consolidarse desde su  
 256 expedición, debido a las tensiones políticas y económicas que lo atraviesan. Además,  
 257 persiste una marcada desarticulación entre los distintos sectores y marcos legislativos,  
 258 lo que se traduce en procesos de planeación territorial deficientes que debilitan las  
 259 estrategias de conservación y dificultan un aprovechamiento sostenible de los recursos  
 260 (García-Reséndez *et al.*, 2023).

261 A pesar de los esfuerzos de los gobiernos en aplicar las políticas ambientales que  
 262 atiendan los problemas nacionales de México, el presente trabajo demuestra que no se  
 263 está cumpliendo con el ordenamiento ecológico. Se requieren proyectos  
 264 interdisciplinarios para la planeación territorial usando Sistemas de Información

265 Geográfica mediante un enfoque bio-regional como escala de análisis para los estudios  
266 ecológicos en cuenca, desarrollo urbano y otros temas socioeconómicos (Barrera-Mejía,  
267 2020).

268 Para pronosticar los impactos futuros, se recomienda emplear modelos  
269 geomáticos basados en la simulación de transiciones, como las Cadenas de Markov y  
270 los Autómatas Celulares (Reynoso-Santos *et al.*, 2016; Ramos-Reyes & Palomeque de  
271 la Cruz, 2023). Asimismo, otro enfoque ampliamente utilizado es la Evaluación  
272 Multicriterio, que además de predecir impactos ambientales, facilita la toma de decisiones  
273 en el ordenamiento territorial y permite zonificar la aptitud del territorio para su  
274 aprovechamiento, conservación y restauración (Parada-Alzate *et al.*, 2024).

275 La combinación de dos o más modelos geomáticos de cambio de uso del suelo  
276 ha demostrado ser eficaz para proyectar la dinámica interna del territorio. Estos modelos  
277 permiten generar escenarios que sirven como base para diseñar alternativas de manejo  
278 ambiental y, al mismo tiempo, brindan herramientas útiles a tomadores de decisiones,  
279 administradores y científicos dedicados a la planificación territorial, con el fin de anticipar  
280 y enfrentar problemas ambientales tanto regionales como globales (Ramos-Reyes &  
281 Palomeque de la Cruz, 2023; Castellanos-Navarrete *et al.*, 2024).

## 282 **Conclusiones**

283 El cambio de uso del suelo en la Cuenca Baja del Usumacinta se ha caracterizado  
284 por una transformación territorial derivada de políticas públicas orientadas al desarrollo  
285 económico, principalmente a través de la expansión agropecuaria, el establecimiento de  
286 plantaciones forestales comerciales y el cultivo de palma de aceite, en detrimento de las  
287 265,778 ha del Bosque Tropical Perennifolio que deja en evidencia el impacto ambiental  
288 y pérdida de la Biodiversidad en el trópico.

289 Aunque los humedales y bosques inundables registraron ganancias significativas  
290 en superficie, estas no compensan los procesos de fragmentación y degradación  
291 ecológica que comprometen la integridad de los ecosistemas, favorecen la pérdida de  
292 biodiversidad y aumentan el riesgo de inundaciones ante fenómenos climatológicos  
293 extremos.

294 Este trabajo prioriza la necesidad de fortalecer las acciones de conservación y  
295 restauración de las Áreas Naturales Protegidas de la Cuenca, mediante la aplicación del  
296 Ordenamiento Ecológico Territorial de Tabasco. Asimismo, resulta imprescindible regular  
297 la expansión urbana en zonas cuya ocupación no es viable debido a sus características  
298 naturales. Se requiere que las prácticas forestales y agrícolas aporten beneficios a las  
299 comunidades sin comprometer los últimos reductos de selva tropical.

300 Resalta mencionar que la teledetección y los sistemas de información geográfica  
301 constituyen herramientas fundamentales para el diagnóstico ambiental en las cuencas  
302 hidrográficas del sureste de México, ya que permiten generar insumos técnicos que  
303 apoyan los procesos de ordenamiento ecológico y la gestión sustentable del territorio.

#### 304 **Agradecimientos**

305 En este apartado se debe incluir el reconocimiento a personas, instituciones, fondos,  
306 becas de investigación, entre otros, que de alguna manera hayan apoyado o colaborado  
307 de forma importante en el desarrollo del estudio. Se colocarán una vez aceptado el  
308 manuscrito.

#### 309 **Declaración de conflicto de intereses**

310 Los autores deben declarar cualquier conflicto de interés que pueda influir o sesgar de  
311 manera inapropiada en el resultado del trabajo. Para tal caso, los autores deberán  
312 agregar el siguiente enunciado:

313 «Los autores declaramos los siguientes intereses económicos (o relaciones personales)  
314 que se pueden considerar como posibles conflictos de intereses: [ENLISTAR LOS  
315 CONFLICTOS DE INTERESES], los cuales fueron resueltos mediante [ACUERDOS]».

316

317 En caso de no existir conflictos de interés, los autores deberán indicar lo siguiente:

318 «Los autores declaramos que no tenemos conflictos de intereses económicos ni  
319 relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en el trabajo presentado en  
320 este artículo».

#### 321 **Declaración del uso de inteligencia artificial (IA)**

322 En caso de haber utilizado IA generativa o tecnologías asistidas por IA en la redacción  
323 científica, se debe declarar mediante una breve descripción:

324 «Durante la preparación de este trabajo, se utilizó [NOMBRE DE LA  
325 HERRAMIENTA/SERVICIO] con la finalidad de [MOTIVO]. Todo el material obtenido con  
326 esta tecnología se revisó y editó, por lo cual los autores asumimos plena responsabilidad  
327 por el contenido del artículo publicado».

328

329 En caso de no haber empleado IA generativa o tecnologías asistidas por IA, los autores  
330 deben declararlo:

331 «Los autores declaramos no haber utilizado IA generativa o tecnologías asistidas por IA  
332 para el desarrollo del presente manuscrito».

333

334 No se permite el uso de IA para la generación de resultados, discusiones y conclusiones,  
335 ni crear o alterar imágenes en los manuscritos.

### 336 Referencias

337 Altamirano, A., Miranda, A., Aplin, P., Carrasco, J., Catalán, G., Cayuela, L., Fuentes-  
338 Castillo, T., Hernández, A., Martínez-Harms, M., Peluso, F., Prado, M., Reyes-  
339 Riveros, R., Van Holt, T., Vergara, C., Zamorano-Elgueta, C., & Di Bella, C. (2020).  
340 Natural forests loss and tree plantations: large-scale tree cover loss differentiation  
341 in a threatened biodiversity hotspot. *Environmental Research Letters*, 15.  
342 <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abca64>.

343 Amaya-Márquez, P. S., Girón-Pucha, B. L., Maza-Maza, J. E., & Luna, A. (2024). Análisis  
344 multitemporal del cambio de uso del suelo en la cuenca del río Zarumilla:  
345 Proyecciones al 2040. *Revista Digital Novasinerгия*, 7(2), 73-86.  
346 <https://doi.org/10.37135/ns.01.14.05>

347 Campbell, M. J., Dennison, P. E., Tune, J. W., Kannenberg, S. A., Kerr, K. L., Coddling,  
348 B. F., & Anderegg, W. R. (2020). A multi-sensor, multi-scale approach to mapping

- 349 tree mortality in woodland ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 245,  
350 111853. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111853>
- 351 Castellanos-Navarrete, A., de Castro, F., & Pacheco, P. (2021). The impact of oil palm  
352 on rural livelihoods and tropical forest landscapes in Latin America. *Journal of Rural*  
353 *Studies*, 81, 294-304. <https://doi.org/10.37135/ns.01.14.05>
- 354 Chen, S., Zhuang, Q., Taheripour, F., Yuan, Y., & Benavidez, L. (2025). Assessment of  
355 global land cover changes using satellite data: intermittent and long-term land cover  
356 changes from 2001 to 2020. *Environmental Research Letters*, 20(3), 034045. DOI:  
357 10.1088/1748-9326/adb5a3
- 358 Cruz-Paz, G., Castillo, M. M., Espinoza-Tenorio, A., Bravo-Peña, L. C., Valencia Barrera,  
359 E., & Mesa-Jurado, M. A. (2018). Áreas prioritarias de conservación en la cuenca  
360 Usumacinta. La aplicación de un enfoque multicriterio. *Investigaciones geográficas*,  
361 (97). <https://doi.org/10.14350/ig.59482>
- 362 Barrera-Mejía, H., & Valle, C. R. A. (2020). El contexto actual del ordenamiento territorial  
363 y ecológico en México. *Espacio Diseño*, (286-287), 60-66.
- 364 Davis, K., Koo, H., Dell'Angelo, J., D'Odorico, P., Estes, L., Kehoe, L., Kharratzadeh, M.,  
365 Kuemmerle, T., Machava, D., Pais, A., Ribeiro, N., Rulli, M., & Tatlhego, M. (2020).  
366 Tropical forest loss enhanced by large-scale land acquisitions. *Nature Geoscience*,  
367 13, 482-488. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0592-3>.
- 368 Dwomoh, F. K., & Auch, R. F. (2024). Characterization of Change in Tree Cover State  
369 and Condition over the Conterminous United States. *Forests*, 15(3), 470.  
370 <https://doi.org/10.3390/f15030470>
- 371 Ellison, D., Pokorný, J., & Wild, M. (2024). Even cooler insights: On the power of forests  
372 to (water the Earth and) cool the planet. *Global change biology*, 30(2), e17195.  
373 <https://doi.org/10.1111/gcb.17195>
- 374 Giam, X. (2017). Global biodiversity loss from tropical deforestation. *Proceedings of the*  
375 *National Academy of Sciences*, 114, 5775 - 5777.  
376 <https://doi.org/10.1073/pnas.1706264114>.
- 377 Eastman, J. R. 2024. TerrSet Libera GIS. Geospatial monitoring and modelling system.  
378 Manual. Clark University. <https://s45055.pcdn.co/centers/geospatial->

- 379 analytics/www-content/blogs.dir/7/files/sites/354/2024/11/Terrset-liberaGIS-  
380 Manual.pdf
- 381 Estrada-Loreto, F., Barba Macías, E., & Ramos Reyes, R. (2013). Cobertura temporal  
382 de los humedales en la cuenca del Usumacinta, Balancán, Tabasco, México.  
383 *Universidad y ciencia*, 29(2), 141-151.  
384 [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0186-](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-29792013000200004&lng=es&tlng=es)  
385 [29792013000200004&lng=es&tlng=es.](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-29792013000200004&lng=es&tlng=es)
- 386 Gallardo-Cruz, J.A., Fernández-Montes de Oca, A., Rives, C. (2019). Detección de  
387 amenazas y oportunidades para la conservación en la cuenca baja del Usumacinta  
388 a partir de técnicas de percepción remota. *Ecosistemas*, 28(2): 82-99. DOI:  
389 10.7818/ECOS.1611
- 390 García-Reséndez, E. R., Anaya-Corona, M., & Bollo-Manent, M. (2023). Ordenamientos  
391 ecológicos locales en Jalisco, México: impedimentos para su expedición. *Sociedad*  
392 *Y Ambiente*, (26), 1–26. <https://doi.org/10.31840/sya.vi26.2620>
- 393 Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017).  
394 Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote*  
395 *sensing of Environment*, 202, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- 396 Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina,  
397 A., ... & Townshend, J. R. (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest  
398 cover change. *Science*, 342(6160), 850-853. DOI:10.1126/science.1244693
- 399 Hansen, M. C., Stehman, S. V., & Potapov, P. V. (2010). Quantification of global gross  
400 forest cover loss. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(19), 8650-  
401 8655. <https://doi.org/10.1073/pnas.0912668107>
- 402 Hernández-Rojas, D. A., López-Barrera, F., & Bonilla-Moheno, M. (2018). Análisis  
403 preliminar de la dinámica de uso del suelo asociada al cultivo palma de aceite  
404 (*Elaeis guineensis*) en México. *Agrociencia*, 52(6), 875–893.  
405 <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v52n6/2521-9766-agro-52-06-875.pdf>
- 406 Hewson, J., Crema, S. C., González-Roglich, M., Tabor, K., & Harvey, C. A. (2019). New  
407 1 km Resolution Datasets of Global and Regional Risks of Tree Cover Loss. *Land*,  
408 8(1), 14. <https://doi.org/10.3390/land8010014>

- 409 Hoang, N., & Kanemoto, K. (2021). Mapping the deforestation footprint of nations reveals  
410 growing threat to tropical forests. *Nature Ecology & Evolution*, 5, 845 - 853.  
411 <https://doi.org/10.1038/s41559-021-01417-z>.
- 412 Isaac-Márquez, R., de Jong, B., Eastmond, A., Ochoa-Gaona, S., Hernández, S., &  
413 Kantún, M. D. (2005). Estrategias productivas campesinas: un análisis de los  
414 factores condicionantes del uso del suelo en el oriente de Tabasco, México.  
415 *Universidad y Ciencia*, 21(42), 57-73.
- 416 Jácome-Flores, M.E., Popoca-Cruz, P.E. and Sanaphre-Villanueva, L. (2024). Not only  
417 biology matters: socioeconomic factors change land prioritization for restoration.  
418 *Restoration Ecology*, 32: e14059. <https://doi.org/10.1111/rec.14059>
- 419 Jones, J. A., Wei, X., Archer, E., Bishop, K., Blanco, J. A., Ellison, D., ... & Creed, I. F.  
420 (2020). Forest-Water Interactions Under Global Change. In: Levia, D.F., Carlyle-  
421 Moses, D.E., Iida, S., Michalzik, B., Nanko, K., Tischer, A. (eds) *Forest-Water*  
422 *Interactions. Ecological Studies*, vol 240. Springer, Cham.  
423 [https://doi.org/10.1007/978-3-030-26086-6\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-030-26086-6_24)
- 424 Keenan, R. J., Reams, G. A., Achard, F., de Freitas, J. V., Grainger, A., & Lindquist, E.  
425 (2015). Dynamics of global forest area: Results from the FAO Global Forest  
426 Resources Assessment 2015. *Forest ecology and management*, 352, 9-20.  
427 <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.06.014>
- 428 Jiménez, L. N. L. (2019). Tabasco es el edén de los humedales. *Emerging Trends in*  
429 *Education*, 25(52), 4.
- 430 Maldonado-Sánchez, E. A., Ochoa-Gaona, S., Ramos-Reyes, R., Guadarrama-Olivera,  
431 M. D. L. Á., González-Valdivia, N., & de Jong, B. H. (2016). La selva inundable de  
432 canacoite en Tabasco, México, una comunidad vegetal amenazada. *Acta botánica*  
433 *mexicana*, (115), 75-101.
- 434 Mashala, M., Dube, T., Mudereri, B., Ayisi, K., & Ramudzuli, M. (2023). A Systematic  
435 Review on Advancements in Remote Sensing for Assessing and Monitoring Land  
436 Use and Land Cover Changes Impacts on Surface Water Resources in Semi-Arid  
437 Tropical Environments. *Remote Sensing*, 15, 3926.  
438 <https://doi.org/10.3390/rs15163926>.

- 439 March-Mifsut, I., Castro, M. (2010). La cuenca del río Usumacinta: Perfil y perspectivas  
440 para su conservación y desarrollo sustentable. In: Cotler H (ed) Las cuencas  
441 hidrográficas de México: Diagnóstico y priorización. Instituto Nacional de Ecología,  
442 SEMARNAT; Fundación Gonzalo Río Arronte I. A. P., Mexico City, Mexico.
- 443 Palomeque-de la Cruz, M. Ángel, Ruíz-Acosta, S. del C., Núñez-Magaña, T. G., Ramos-  
444 Reyes, R., Galindo-Alcántara, A., & Magaña-Alejandro, M. A. (2025). Modeling of  
445 Land use Change and Projection in Tenosique, Tabasco, Mexico. *Revista Terra*  
446 *Latinoamericana*, 43. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.1821>
- 447 Parada-Alzate, L. M., Andramunio-Acero, C. P., López-Muñoz, M. T., Rondón-Martínez,  
448 Y. F., & Moreno-Pérez, L. A. (2024). Zonificación de Altos Valores de Conservación  
449 (AVC) del Complejo Cenagoso de Zapatosa (Colombia) a partir de una evaluación  
450 multicriterio. *Investigaciones geográficas*, (115). <https://doi.org/10.14350/rig.60945>
- 451 Peralta-Carreta, C., García-Hidalgo, G., Gallardo-Cruz, J. A., Medrano-Pérez, O. R., &  
452 Charruau, P. (2025). Remote sensing applied to the morphodynamics of the  
453 meandering Usumacinta River in the period 1986-2019. *Revista Brasileira De*  
454 *Geomorfologia*, 26(1). <https://doi.org/10.20502/rbg.v26i1.2560>
- 455 Peralta-Carreta, C., Medrano-Pérez, O.R., Alcudia-Aguilar, A., Pham, Q.B., & Megia-  
456 Vera, H.J. (2025a). Spatial Distribution of Relict Inland Mangrove (*Rhizophora*  
457 *mangle L.*) in the San Pedro River Basin: A Transboundary Analysis between  
458 Mexico and Guatemala. *Estuaries and Coasts*, 48, 59.  
459 <https://doi.org/10.1007/s12237-025-01492-6>
- 460 Peralta-Carreta, C., Gallardo-Cruz, J. A., Solórzano, J. V., & Hernandez-Gómez, M.  
461 (2019). Clasificación del uso de suelo y vegetación en áreas de pérdida de  
462 cobertura arbórea (2000–2016) en la cuenca del río Usumacinta. *Madera Y*  
463 *Bosques*, 25(3). <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2531779>
- 464 Ramírez-García, A. R., Zavala-Cruz, J., Rincón-Ramírez, J. A., Guerrero-Peña, A.,  
465 García-López, E., Sánchez-Hernández, R., ... & Ortiz-Pérez, M. A. (2022).  
466 Vegetation cover and land use change (1947-2019) in the region of Los Ríos,  
467 Tabasco, México. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 28(3),  
468 465-481. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2022.01.001>

- 469 Ramos-Reyes, R. & Palomeque de la Cruz, M.A. (2023): Cambio de uso del suelo y  
470 escenarios prospectivos en el Estado de Tabasco (México). *Anales de Geografía*  
471 de la Universidad Complutense, 43(1), 185-209.
- 472 Reyes Grande, F. (2015). ¿Sustentabilidad versus subsistencia? Un estudio de caso  
473 dentro del Área Natural Protegida Cañón del Usumacinta. *Relaciones. Estudios de*  
474 *Historia y Sociedad*, 36(142), 261–305.  
475 <https://www.scielo.org.mx/pdf/rz/v36n142/0185-3929-rz-36-142-00261.pdf>
- 476 Reynoso-Santos, R., Valdez-Lazalde, J. R., Escalona-Maurice, M. J., de los Santos-  
477 Posadas, H.M. & Pérez-Hernández, M. J. (2016): Cadenas de Markov y autómatas  
478 celulares para la modelación de cambio de uso de suelo. *Ingeniería hidráulica y*  
479 *ambiental*, 37(1), 72-81. [https://ojs2.fch.unicen.edu.ar/ojs-](https://ojs2.fch.unicen.edu.ar/ojs-3.1.0/index.php/estudiossocioterritoriales/article/view/289)  
480 [3.1.0/index.php/estudiossocioterritoriales/article/view/289](https://ojs2.fch.unicen.edu.ar/ojs-3.1.0/index.php/estudiossocioterritoriales/article/view/289)
- 481 Riley, C. B., & Gardiner, M. M. (2020). Examining the distributional equity of urban tree  
482 canopy cover and ecosystem services across United States cities. *PLoS One*,  
483 15(2), e0228499. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0228499>
- 484 San Pallo, M. G., Muñoz, D. E. R., Jurado, M. A. M., & Perera, M. Á. D. (2019). Informes  
485 de gobierno y paisaje forestal en Tabasco y Chiapas de 1947 a 1982.  
486 *EntreDiversidades. Revista de ciencias sociales y humanidades*, (13), 233-262.
- 487 Senior, R.A., Hill, J.K. & Edwards, D.P. (2019). Global loss of climate connectivity in  
488 tropical forests. *Nature Climate Change*, 9, 623–626.  
489 <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0529-2>
- 490 Sloan, S., & Sayer, J. (2015). Forest Resources Assessment of 2015 shows positive  
491 global trends but forest loss and degradation persist in poor tropical countries.  
492 *Forest Ecology and Management*, 352, 134-145.  
493 <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2015.06.013>.
- 494 Soasores, D. & Garcia-Garcia, A. (2017). Vision climatica de la precipitación en la cuenca  
495 del río Usumacinta. La cuenca del río Usumacinta desde la perspectiva del cambio  
496 climatico. Mexico: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- 497 Srisunthon, P., & Chawchai, S. (2020). Land-use changes and the effects of oil palm  
498 expansion on a peatland in southern Thailand. *Frontiers in Earth Science*, 8,  
499 559868. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.559868>

- 500 Timilsina, S., Aryal, J., & Kirkpatrick, J. B. (2020). Mapping Urban Tree Cover Changes  
 501 Using Object-Based Convolution Neural Network (OB-CNN). *Remote Sensing*,  
 502 12(18), 3017. <https://doi.org/10.3390/rs12183017>
- 503 Tyukavina, A., Baccini, A., Hansen, M., Potapov, P., Stehman, S., Houghton, R., Krylov,  
 504 A., Turubanova, S., & Goetz, S. (2015). Aboveground carbon loss in natural and  
 505 managed tropical forests from 2000 to 2012. *Environmental Research Letters*, 10.  
 506 <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/7/074002>.
- 507 Vázquez-Negrín I, Castillo-Acosta O, Valdez-Hernández JI, Zavala-Cruz J, Martínez-  
 508 Sánchez JL. 2011. Estructura y composición florística de la selva alta perennifolia  
 509 en el ejido Niños Héroes Tenosique, Tabasco, México. *Polibotánica* 32: 41-61.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco  
 México

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México

Capítulo IV.  
**Conclusiones y recomendaciones**

#### 4. Conclusiones

La modelación del cambio de uso del suelo (CUS) para la restauración en la Cuenca Baja del Río Usumacinta (CBRU) permitieron sintetizar de forma espacial y temporal los procesos de transformación del paisaje en una región de alta biodiversidad y valor ecológico estratégico. La aplicación integrada de imágenes satelitales *LandSat 8 OLI*, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y el Modelo Digital de Elevación (DEM) reveló una dinámica de cambio asociada principalmente a la expansión agropecuaria y al establecimiento de plantaciones forestales y de palma de aceite, en concordancia con tendencias globales en regiones tropicales (Bunyangha et al., 2021; Zhang et al., 2023).

Los resultados de la clasificación no supervisada (ISODATA) mostraron un patrón inicial dominado por actividades antropogénicas (55 %), seguidas por humedales (16 %) y vegetación arbórea (21 %), con un índice kappa de 0.51, indicando concordancia moderada. Aunque esta técnica permitió una visión general del mosaico de coberturas, su efectividad fue limitada por la heterogeneidad espacial y complejidad espectral de los ecosistemas tropicales, fenómeno también reportado en otras regiones similares (Lemenkova, 2021a; Abbas et al., 2016).

En contraste, la clasificación supervisada (*Maximum Likelihood Classification*, MLC) alcanzó una precisión del 92 % y un índice kappa de 0.90, evidenciando la eficacia de incorporar NDVI y DEM en la discriminación espectral. Se identificaron ocho clases principales de cobertura, entre las que destacan el uso agropecuario (41.46 %), los humedales (21.17 %), los bosques inundados (13.15 %) y las plantaciones forestales comerciales (4.09 %). Estos resultados coinciden con investigaciones previas en la región (Ramírez-García et al., 2022).

El uso del DEM mejoró la discriminación entre coberturas, especialmente entre bosques tropicales y plantaciones, reduciendo la confusión espectral en áreas de relieve bajo, lo cual coincide con lo reportado por Eiumnoh y Shrestha (2000). Los datos integrados muestran una fragmentación creciente del paisaje, con remanentes de vegetación natural confinados a humedales y áreas protegidas, mientras que la matriz territorial está dominada por actividades agropecuarias. Este patrón refleja una presión antrópica constante, similar a la observada en otras cuencas tropicales del hemisferio sur (Belayneh et al., 2020; Kassahun et al., 2024).

#### 4.1. Implicaciones ecológicas y de manejo

La presencia dominante de actividades agropecuarias en más del 40 % del área analizada indica una sustitución sistemática de la vegetación natural por usos productivos. Esto afecta directamente servicios ecosistémicos clave como la regulación hídrica y el almacenamiento de carbono, en particular en los humedales de Centla y Jonuta, los cuales son altamente vulnerables a la pérdida de cobertura vegetal. Camacho-Valdez et al. (2022) advierten que el crecimiento de la palma de aceite en esta zona ha incrementado la presión sobre los ecosistemas ribereños, promoviendo la pérdida de hábitats naturales.

La modelación de las coberturas del año 2021 permitió identificar áreas prioritarias para restauración en terrenos con pendientes menores a 5°, suelos Gleysoles y Fluvisoles, y cercanía a cuerpos de agua, condiciones favorables para la reforestación y la conectividad ecológica. Estos resultados coinciden con los enfoques de restauración basados en paisaje planteados por (Gallardo-Cruz et al. 2021).

Desde el enfoque de gestión ambiental, la información generada constituye una herramienta geoespacial útil para el ordenamiento ecológico y territorial, así como para la toma de decisiones en conservación y uso sustentable del territorio. La combinación de imágenes satelitales y análisis espaciales provee una base técnica sólida para el monitoreo de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente el ODS 15: Vida de ecosistemas terrestres.

#### 4.2. Conclusiones generales

- La teledetección multiespectral, combinada con datos topográficos y vegetacionales, resultó eficaz para caracterizar el mosaico de coberturas del suelo en la CBRU. La clasificación supervisada (MLC) alcanzó una precisión superior al 90 %, evidenciando la utilidad de integrar NDVI y DEM en ambientes tropicales (Ahmad & Quegan, 2012; Richards, 2022).
- La expansión agropecuaria y la instalación de plantaciones de palma de aceite son los principales impulsores del cambio de uso del suelo en la cuenca. Este fenómeno responde a una tendencia regional hacia la intensificación productiva en detrimento de la cobertura natural (Dai et al., 2024; Mulatu et al., 2024).

- Los humedales, bosques inundados y vegetación arbórea conforman núcleos estratégicos para la restauración ecológica y la conectividad del paisaje. Su identificación constituye un punto de partida para el diseño de corredores biológicos y programas de restauración.
- La información espacial generada tiene alto valor para el manejo adaptativo de recursos naturales y la planificación territorial. Las cartografías obtenidas pueden ser insumos clave para programas de ordenamiento ecológico y la gestión de Áreas Naturales Protegidas (ANP).
- Se recomienda fortalecer el uso de series multitemporales y técnicas de *machine learning* para mejorar la detección de cambios y la modelación predictiva de escenarios futuros, como proponen (Tobar-Díaz et al. 2023).

#### 4.3. Consideraciones finales

El presente estudio proporciona una visión integral de la dinámica del uso del suelo en la CBRU, destacando los desafíos de conservación ante la presión antrópica y los cambios ambientales. Las herramientas de teledetección y modelación espacial demostraron ser instrumentos científicos valiosos para orientar estrategias de restauración y planificación ambiental sostenible.

La integración de información geoespacial actualizada y variables ambientales clave permite avanzar hacia modelos de gobernanza ecológica basados en evidencia, donde la conservación y el aprovechamiento racional de los recursos naturales puedan coexistir bajo principios de sostenibilidad, equidad y resiliencia.

La investigación tuvo como objetivo analizar los cambios de uso del suelo en la CBRU, evaluando su evolución entre 2000 y 2021. A través del *Land Change Modeler*, se integraron técnicas de teledetección, SIG para responder sólidamente a las preguntas de investigación y validar la hipótesis formulada.

Los análisis evidencian una pérdida persistente de cobertura vegetal, particularmente en selvas y humedales, acentuada en zonas con mayor accesibilidad y presión demográfica. Se identificaron focos de deforestación intensiva en Balancán, Tenosique y Centla, con una probabilidad de conversión.

Finalmente, la investigación demuestra que la pérdida de cobertura vegetal está asociada a la degradación de servicios ecosistémicos clave, con implicaciones directas sobre el bienestar

humano. La modelación espacial y predictiva se consolida, así como una herramienta esencial para la conservación de cuencas tropicales.

La investigación realizada en la Cuenca Baja del Río Usumacinta (CBRU) confirma que la expansión agropecuaria y urbana ha sido el principal impulsor del cambio de uso del suelo entre 2000 y 2021. Utilizando técnicas de teledetección, clasificación supervisada y modelación espacial, se evidenció una pérdida progresiva de cobertura natural —especialmente selva y humedales—, así como una creciente fragmentación del paisaje.

La incorporación del NDVI y el DEM mejoró significativamente la precisión de las clasificaciones, alcanzando niveles superiores al 90%. Las variables más influyentes en la transformación territorial fueron la accesibilidad, altitud, densidad poblacional y cercanía a cuerpos de agua, de mantenerse las tendencias actuales, aumentará la fragmentación y pérdida de hábitats, afectando servicios ecosistémicos críticos para la región.

Esta investigación demuestra el valor de las herramientas geospaciales para orientar políticas públicas, programas de restauración y modelos de gobernanza territorial sostenible en regiones de alta vulnerabilidad ecológica.

### Anexo

<b>Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional</b>	
Título de Tesis:	MODELACIÓN DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO USUMACINTA, MÉXICO
Autor(a) o autores(ras) de la Tesis:	HÉCTOR JAVIER MEGIA VERA
ORCID:	<a href="https://orcid.org/0000-0001-6499-5404">https://orcid.org/0000-0001-6499-5404</a>
Resumen de la Tesis:	<p>La presente examina el cambio de uso y cobertura del suelo (CUS) en la cuenca baja del río Usumacinta, Tabasco–Campeche, México, una región de alta relevancia ecológica, hidrológica y biocultural del sureste mexicano. A partir de la integración de técnicas de percepción remota, sistemas de información geográfica (SIG) y modelación predictiva mediante el módulo <i>Land Change Modeler</i> (TerrSet 2020), se analiza la evolución del uso del suelo entre los años 2000 y 2021 bajo dos supuestos: tendencial y conservacionista. El estudio adopta un enfoque cuantitativo, explicativo y multiescalar, incorporando variables biofísicas, con el objetivo de identificar los principales factores que impulsan la deforestación y la fragmentación del paisaje. Los resultados esperados permitirán delimitar áreas críticas de pérdida de cobertura vegetal, evaluar la correspondencia entre la transformación territorial y las zonas de conservación, y aportar evidencia científica para la toma de decisiones en materia de ordenamiento ecológico, restauración y manejo sostenible de los recursos naturales. Esta investigación busca fortalecer la comprensión de los procesos socioecológicos que modelan el territorio y ofrecer un marco técnico-metodológico aplicable a la gestión ambiental en cuencas tropicales de alta vulnerabilidad.</p>
Palabras claves de la Tesis:	cambio de uso del suelo, modelación espacial, cuenca baja del Usumacinta, SIG, deforestación, gestión ambiental.
Referencias citadas:	Agarwal, C., Green, G. M., Grove, J. M., Evans, T. P., & Schweik, C. M. (2002). A review and assessment of land-use change models: Dynamics of space, time, and

human choice. USDA Forest Service, General Technical Report NE-297. <https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/16512>

Belgiu, M., & Drăguț, L. (2016). Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 114, 24–31. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011>

Calzada, A., Pérez-Miranda, R. C., & Bravo, L. C. (2018). Land use and cover change in tropical dry ecosystems of Mexico. *Applied Geography*, 95, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.04.007>

Chang-Martínez, L. A., Mas, J. F., Valle, N. T., Torres, P. S. U., & Folan, W. J. (2015). Modeling historical land cover and land use: A review from contemporary modeling. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(4), 1791–1812. <https://doi.org/10.3390/ijgi4041791>

CONABIO. (2022). Informe de la cobertura forestal y deforestación en México 2015–2020. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. <https://www.biodiversidad.gob.mx/>

Congalton, R. G., & Green, K. (2019). *Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices* (3rd ed.). CRC Press.

Cruz, R., Ramos-Reyes, R., & Gama-Campillo, L. (2023). Tendencias recientes de deforestación y restauración en el sureste de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 94(2), e943. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2023.94.943>

De Alba-Rosano, C. C., & Cervantes-Vázquez, J. (2020). Revisión sistemática de cuarenta años de análisis del cambio de uso del suelo en México mediante SIG. *Geografía Espacios*, 10(20), 139–162. <https://doi.org/10.25074/07197209.20.1740>

Eastman, J. R. (2020). *IDRISI TerrSet: Geospatial Monitoring and Modeling System*. Clark University.

Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., et al. (2005). Global consequences of land use. *Science*, 309(5734), 570–574. <https://doi.org/10.1126/science.1111772>

Gallardo-Cruz, J. A., Pérez-García, C. P., & Martínez, M. (2021). Deforestation and trends of change in protected areas of the Usumacinta River Basin (2000–2018). *Regional Environmental Change*, 21(7), 118–135. <https://doi.org/10.1007/s10113-021-01833-8>

- Geist, H. J., & Lambin, E. F. (2002). Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation. *BioScience*, 52(2), 143–150. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2002\)052 \[0143:PCAUDF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0143:PCAUDF]2.0.CO;2)
- Giljum, S., Wieland, H., & Bruckner, M. (2021). Land use and human well-being: A global assessment. *Environmental Research Letters*, 16(4), 045002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abe9b3>
- Gusti, M., & Kindermann, G. (2011). An approach for quantifying the impact of changes in land-use patterns on terrestrial carbon stocks in the tropics. *Environmental Modelling & Software*, 26(11), 1515–1528. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.07.009>
- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., et al. (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 342(6160), 850–853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>
- Hernández-Sampieri, R., Mendoza, C., & Torres, C. (2022). Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta (7ª ed.). McGraw-Hill.
- INECC. (2022). Estrategia Nacional de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático 2022–2030. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/inecc>
- Lambin, E. F., & Geist, H. J. (2006). Land-use and land-cover change: Local processes and global impacts. Springer.
- Martín-López, B., Felipe-Lucia, M. R., Bennett, E. M., Norström, A. V., Peterson, G. D., et al. (2021). Projecting effects of land use change on human well-being through ecosystem services. *People and Nature*, 3(2), 305–320. <https://doi.org/10.1002/pan3.10186>
- Mazo, P., González-Suárez, J., & Fandiño, L. (2022). Land-use change and landscape fragmentation in tropical forests using CA-Markov models. *Ecological Modelling*, 470, 110006. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2022.110006>
- Mazy, J., & Longaretti, P.-Y. (2022). Spatial hybrid modelling for socio-ecological systems: Coupling agent-based and cellular automata approaches. *Environmental Modelling & Software*, 156, 105461. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105461>
- McGarigal, K., Cushman, S. A., & Ene, E. (2012). FRAGSTATS v4: Spatial pattern analysis program for categorical maps. University of Massachusetts.

Peralta-Carreta, J. A., Chávez-González, H., & Cruz, R. H. (2019). Clasificación del uso de suelo y vegetación en áreas de pérdida de cobertura arbórea (2000–2016) en la cuenca del río Usumacinta. *Madera y Bosques*, 25(3), 177–190. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2531779>

Pontius, R. G., & Malanson, J. (2005). Comparison of the structure and accuracy of two land change models. *International Journal of Geographical Information Science*, 19(2), 243–265. <https://doi.org/10.1080/13658810410001713380>

Prieto-Amparán, J. A., Treviño-Garza, E. J., & González-Tagle, M. A. (2019). Spatial near-future modeling of land use and land cover change scenarios for a forest region in northern Mexico. *Remote Sensing*, 11(5), 643. <https://doi.org/10.3390/rs11050643>

Song, X. P., Hansen, M. C., Potapov, P. V., et al. (2022). Global land change from 2000 to 2020. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3, 939–951. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00349-3>

Turner, B. L., Lambin, E. F., & Reenberg, A. (2007). The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(52), 20666–20671. <https://doi.org/10.1073/pnas.0704119104>

Verburg, P. H., Schot, P., Dijst, M., & Veldkamp, A. (2011). Land-use change modelling: Current practice and research priorities. *GeoJournal*, 61(4), 309–324. <https://doi.org/10.1023/B:GEJO.0000034736.59344.38>

Zhou, Y., Liu, X., & Li, X. (2025). A bibliometric review of land use and land cover change simulation models (1988–2023). *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9, 1548565. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1548565>

Abbas, A. W., Minallh, N., Ahmad, N., Abid, S. A. R., & Khan, M. A. A. (2016). K-Means and ISODATA clustering algorithms for landcover classification using remote sensing. *Sindh University Research Journal-SURJ (Science Series)*, 48(2).

Al Khafaji, R. G. A. H., & Al-Zubaidi, E. A. 2024 Unsupervised Classification of Landsat-8 Satellite Imagery-Based on ISO Clustering, *Wasit Journal of Computer and Mathematics Science*, Vol. 3 No.1 (2024) p. 40-53 <https://doi.org/10.31185/wjcms.212>

Ahmad, A., & Quegan, S. (2012). Analysis of maximum likelihood classification on multispectral data. *Applied Mathematical Sciences*, 6(129), 6425-6436. <https://www.m-hikari.com/ams/ams-2012/ams-129-132-2012/ahmadAMS129-132-2012.pdf>

Aplin, P. & Atkinson, PM (2004). Predecir los límites de campo faltantes para aumentar la precisión de la clasificación por campo. *Ingeniería fotogramétrica y teledetección*, 70(1), 141–149. doi:10.14358/pers.70.1.141

Bahadur Krishna, K.C. Spatio-temporal patterns of agricultural expansion and its effect on watershed degradation: a case from the mountains of Nepal. *Environ Earth Sci* 65, 2063–2077 (2012). <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1186-6>

Belayneh, Y., Ru, G., Guadie, A. Forest cover change and its driving forces in Fagita Lekoma District, Ethiopia. *J. For. Res.* 31, 1567–1582 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11676-018-0838-8>

Bendib, A., Boutrid, M.L. Use of Geostatistical Methods Involving Standard Deviation and Semivariogram to Assess the Accuracy of Water Surface Extraction by Supervised Classification. *J Indian Soc Remote Sens* 52, 63–77 (2024). <https://doi.org/10.1007/s12524-023-01802-0>

Bishop, Y.M.M., Fienberg, S.E., Holland, P.W., Light, R.J., Mosteller, F., 1977. Book Review: *Discrete Multivariate Analysis: Theory and Practice*. *Applied Psychological Measurement* 1(2), 297-306. <https://doi.org/10.1177/014662167700100218>

Bonilla-Moheno, M., & Aide, T. M. (2020). Beyond deforestation: Land cover transitions in Mexico. *Agricultural Systems*, 178, 102734. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102734>

Bunyangha, J., Majaliwa, M. J., Muthumbi, A. W., Gichuki, N. N., & Egeru, A. (2021). Past and future land use/land cover changes from multi-temporal Landsat imagery in Mpologoma catchment, eastern Uganda. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 24(3), 675-685. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.02.003>

Castillo Cruz, Z. G., & Medrano Pérez, O. R. (2023). Análisis geomorfológico de las subcuencas Usumacinta y Grijalva en el sureste de México. *Acta Universitaria*, 33, 1–20. <https://doi.org/10.15174/au.2023.3684>

Chuvienco E (2002) *Teledetección Ambiental*. Ediciones Ariel. 586 pp.

<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Universidad Autónoma de Tabasco</p>	<p>Cohen, J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. <i>Educational and psychological measurement</i>, 20(1), 37-46. <a href="https://doi.org/10.1177/001316446002000104">https://doi.org/10.1177/001316446002000104</a></p> <p>CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2023). Normales Climatológica por Estado. Search to Tabasco. Servicio Meteorológico Nacional (SMN). In 27th of August 2023: <a href="https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado">https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado</a></p> <p>Congalton, R. G., &amp; Green, K. (2019). <i>Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices</i>. CRC press. <a href="https://doi.org/10.1201/9780429052729">https://doi.org/10.1201/9780429052729</a></p> <p>Cotler, H., Garrido, A., Bunge, V., &amp; Cuevas, M. L. (2010). Las cuencas hidrográficas de México: priorización y toma de decisiones. <i>Las cuencas hidrográficas de México: diagnóstico y priorización</i>, 1, 210-215.</p> <p>Dangia, D. Dessalegn. 2020. Forest cover change detection using Geographic Information Systems and remote sensing techniques: The Spatio-temporal study on Komto Protected Forest priority area, East Wollega Zone, Ethiopia. <i>J. Environ Syst. Res</i>, 2-14.</p> <p>Din, M. S. U., Mubeen, M., Hussain, S., Ahmad, A., Hussain, N., Ali, M. A., &amp; Nasim, W. (2022). World nations priorities on climate change and food security. <i>Building Climate Resilience in Agriculture: Theory, Practice and Future Perspective</i>, 365-384. Springer, Cham. <a href="https://doi.org/10.1007/978-3-030-79408-8_22">https://doi.org/10.1007/978-3-030-79408-8_22</a></p> <p>Eiumnoh, A., &amp; Shrestha, R. P. (2000). Application of DEM data to Landsat image classification: Evaluation in a tropical wet-dry landscape of Thailand. <i>PE &amp; RS- Photogrammetric Engineering &amp; Remote Sensing</i>, 66(3), 297-304.</p> <p>ERDAS. 1999. <i>Erdas Field Guide</i>. Fifth edition revised and expanded. Atlanta Georgia, USA. Erdas Inc. 698 p.</p> <p>Espinoza-Guzmán, M. A., Borrego, D. A., &amp; Sahagún-Sánchez, F. J. (2023). Evaluation of recent land-use and land-cover change in a mountain region. <i>Trees, Forests and People</i>, 11, 100370. <a href="https://doi.org/10.1016/j.tfp.2023.100370">https://doi.org/10.1016/j.tfp.2023.100370</a></p> <p>Fernández-Fierro, A. A., Rosero-Eraza, C. R., Beltrán-Dávalos, A. A., &amp; Echeverría-Guadalupe, M. M. (2020). Caracterización y dinámica de la cobertura de suelo mediante Teledetección: caso de estudio volcán Tungurahua, Ecuador. <i>Dominio De Las Ciencias</i>, 6(2), pp. 906–938. <a href="https://doi.org/10.23857/dc.v6i2.1201">https://doi.org/10.23857/dc.v6i2.1201</a></p>
--	--

<p>Universidad Autónoma de Tlaxcala</p>	<p>Fleiss, J. L., Levin, B., &amp; Paik, M. C. (1981). The measurement of interrater agreement. <i>Statistical methods for rates and proportions</i>, 2(212-236), 22-23.</p> <p>Foody, GM (2020). Explicar la inadecuación del coeficiente kappa en la evaluación y comparación de la precisión de mapas temáticos obtenidos mediante clasificación de imágenes. <i>Teledetección del medio ambiente</i>, 239, 111630. <a href="https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111630">https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111630</a>.</p> <p>Gaitan, J., Ciano, N., Oliva, G., Bran, D., Butti, L., Cariac, G., Caruso, C., Opazo, W., Ferrante, D., Echevarria, D., Buono, G., Fantozzi, A., Guirado, E., &amp; Maestre, F. (2021). La variación temporal del índice NDVI predice los cambios temporales de la cobertura vegetal en las tierras secas de la Patagonia Argentina: <i>Ecosistemas</i>, 30(3), 2229. <a href="https://doi.org/10.7818/ECOS.2229">https://doi.org/10.7818/ECOS.2229</a></p> <p>Gallardo-Cruz, J. A., Peralta-Carreta, C., Solórzano, J. V., Fernández-Montes de Oca, A. I., Nava, L. F., Kauffer, E., &amp; Carabias, J. (2021). Deforestation and trends of change in protected areas of the Usumacinta River basin (2000–2018), Mexico and Guatemala. <i>Regional Environmental Change</i>. <a href="https://doi.org/10.1007/s10113-021-01833-8">https://doi.org/10.1007/s10113-021-01833-8</a></p> <p>Gallardo-Cruz, J.A., Fernández-Montes de Oca, &amp; A., Rives, C. (2019). Detección de amenazas y oportunidades para la conservación en la cuenca baja del Usumacinta a partir de técnicas de percepción remota. <i>Ecosistemas</i>, 28(2): 82-99. <a href="https://doi.org/10.7818/ECOS.1611">https://doi.org/10.7818/ECOS.1611</a></p> <p>García Mora, T. J., &amp; Mas, J. F. (2008). Comparación de metodologías para el mapeo de la cobertura y uso del suelo en el sureste de México. <i>Investigaciones geográficas</i> (67), 7-19.</p> <p>García, A.E. (1988). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, UNAM, México, 217 p.</p> <p>Garg, V., Aggarwal, S. P., Gupta, P. K., Nikam, B. R., Thakur, P. K., Srivastav, S. K., &amp; Senthil Kumar, A. (2017). Assessment of land use land cover change impact on hydrological regime of a basin. <i>Environmental Earth Sciences</i>, 76, 635. <a href="https://doi.org/10.1007/s12665-017-6976-z">https://doi.org/10.1007/s12665-017-6976-z</a></p> <p>Govender, M., Chetty, K., Naiken, V., &amp; Bulcock, H. (2008). A comparison of satellite hyperspectral and multispectral remote sensing imagery for improved classification</p>
---	---

and mapping of vegetation. *Water sa*, 34(2), 147-154. <https://doi:10.4314/wsa.v34i2.183634>

Guzmán, R., Bezada, M., & Rodríguez-Santalla, I. (2023). Mapeo de la cobertura del suelo utilizando datos de teledetección en la llanura aluvial del río Apure (Venezuela). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 49 (1), 113–137. <https://doi.org/10.18172/cig.5607>  
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1002.4046>

INEGI. 2012. Continúo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0). Modelo de elevación, 15 metros. <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/continuoelevaciones.aspx>

INEGI. 2013. Conjunto Nacional de Uso del Suelo y Vegetación a escala 1:250,000, Seria VII, DGG-INEGI, México.

Jiménez, AA, Vilchez, FF, González, ON, & Flores, SMM (2018). Analysis of the Land Use and Cover Changes in the Metropolitan Area of Tepic-Xalisco (1973–2015) through Landsat Images. *Sustainability*, 10 (6), 1860 <https://doi.org/10.3390/su10061860>

Kassahun, M., Hundera, K. y Senbeta, F. (2024). Analysis of land use/ land cover changes and landscape fragmentation in the Baro-Akobo Basin, Southwestern Ethiopia. *Heliyon*, 10 (7), e28378. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28378>

Kauffer, Edith. (2021). Hidroextractivismo en la cuenca del Usumacinta: entre dinámicas transfronterizas y diferenciaciones fronterizas. *Trace (México, DF)* (80), 171-199. Epub 11 de octubre de 2021. <https://doi.org/10.22134/trace.80.2021.792>

Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). An application of hierarchical kappa-type statistics in the assessment of majority agreement among multiple observers. *Biometrics*, 363-374. <https://doi.org/10.2307/2529465>

Langford, M., & Bell, W. (1997). Land cover mapping in a tropical hillsides environment: A case study in the Cauca region of Colombia. *International Journal of Remote Sensing*, 18(6), 1289–1306. <https://doi.org/10.1080/014311697218421>

Lemenkova, P. (2021). Evaluating land cover types from Landsat TM using SAGA GIS for vegetation mapping based on ISODATA and K-means clustering. *Acta Agriculturae Serbica*, 26 (56), 159-165. <https://doi:10.5937/AASer2152159L>

	<p>Lemenkova, P. (2021). SAGA GIS for Computing Multispectral Vegetation Indices by Landsat TM for Mapping Vegetation Greenness. <i>Contemporary Agriculture</i>, 70 (1-2) 67-75. <a href="https://doi.org/10.2478/contagri-2021-0011">https://doi.org/10.2478/contagri-2021-0011</a></p> <p>López, L. D., &amp; Saavedra, G. A. (2023). Detailed Land Cover and Land Use Mapping, A New Approach: Case Study, Usumacinta Watershed, Mexico. <i>European Journal of Applied Sciences</i>, 1(1). 408-418 <a href="https://doi.org/10.14738/aivp.111.12457">https://doi.org/10.14738/aivp.111.12457</a></p> <p>Ma, Z., Liu, Z., Zhao, Y., Zhang, L., Liu, D., Ren, T., &amp; Li, S. (2020). Un método de clasificación de cultivos no supervisado basado en binning isométrico de componentes principales. <i>ISPRS International Journal of Geo-Information</i> <a href="https://doi.org/10.3390/ijgi9110648">https://doi.org/10.3390/ijgi9110648</a></p> <p>Makandar, A., &amp; Kaman, S. (2021). Land use Land Cover Study of Sentinel-2A and Landsat-5 Images using NDVI and Supervised Classification Techniques. <i>explorer</i>, <a href="https://doi:10.21917/ijivp.2021.0365">https://doi:10.21917/ijivp.2021.0365</a></p> <p>March-Mifsut, I., &amp; Castro, M. (2010). La Cuenca del Río Usumacinta: Perfil y perspectivas para su conservación y desarrollo sustentable. En H. Cotler Ávalos (Ed.), <i>Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización</i> (pp. 193–197). México D.F.: SEMARNAT, INE, IAP. <a href="https://agua.org.mx/biblioteca/las-cuencas-hidrograficas-demexico-diagnostico-y-priorizacion">https://agua.org.mx/biblioteca/las-cuencas-hidrograficas-demexico-diagnostico-y-priorizacion</a></p> <p>Maselli, F., C. Conese, L. Petkiv and R. Resti (1992), "Inclusion of prior probabilities derived from a nonparametric process into the maximum likelihood classifier", <i>Photogrammetric Engineering and Remote Sensing</i>, vol. 58, pp. 201–207.</p> <p>Melesse, A. M., &amp; Jordan, J. D. (2002). A comparison of fuzzy vs. augmented-ISODATA classification algorithms for cloud-shadow discrimination from Landsat images. <i>Photogrammetric Engineering and Remote Sensing</i>, 68(9), 905-912.</p> <p>Meave, J. A., Gallardo-Cruz, J. A., Hernández, C. A. M., Martínez-Camilo, R., Pérez, M. E. V., &amp; Carabias, J. (2022). Tipos de vegetación de la cuenca del río Usumacinta. <i>Universidad Iberoamericana AC</i>.</p> <p>Mengqi Duan, Canción Xiangyun, Zengqiang li, Xiaoguang Zhang, Xiaodong Ding, Dejie Cui 2024 Identifying soil groups and selecting a high-accuracy classification method based on multi-textural features with optimal window sizes using remote</p>
--	---

<https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102563>

Mohammed, N. Z., Ghazi, A., & Mustafa, H. E. (2013). Positional accuracy testing of Google Earth. *International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering*, 4(6), 6-9. ISSN: 2045-7057

Mulatu, K., Hundera, K., & Senbeta, F. (2024). Analysis of land use/land cover changes and landscape fragmentation in the Baro-Akobo Basin, Southwestern Ethiopia. *Heliyon*, 10 (7). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28378>

Nay J., Burchfield E. & Gilligan J. (2017) A machine-learning approach to forecasting remotely sensed vegetation health. *International Journal of Remote Sensing*, 39(6), 1800-1816, <https://doi:10.1080/01431161.2017.1410296>

Olokeogun, O. S., Iyiola, K., & Iyiola, O. F. (2014). Application of remote sensing and GIS in land use/land cover mapping and change detection in Shasha Forest reserve, Nigeria. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40, 613-616.

Orjuela-Cañón, A. D., Figueroa-García, J. C., & Arias-Londoño, J. D. (Eds.). (2019). *Applications of Computational Intelligence. Communications in Computer and Information Science*. <https://doi:10.1007/978-3-030-36211-9>

Padilla-Romero, A., & Hernández-Juárez, M. (2023). Cambio de uso de suelo por la construcción del NAICM en Texcoco, Estado de México. *Terra Latinoamericana*, 41, 1-15. e1608. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1608>

Palacio-Prieto, J. L., & Luna-González, L. (1996). Improving spectral results in a GTS context. *International Journal of Remote Sensing*, 2201–2209. <https://doi.org/10.1080/01431169608948766>

Palaniswami, C., Upadhyay, A. K., & Maheswarappa, H. P. (2006). Spectral mixture analysis for subpixel classification of coconut. *Current Science*, 1706-1711 <http://www.jstor.org/stable/24094026>

Palma-López, D. J., Cisneros, D. J., Moreno, C. E., & Rincón-Ramírez, J. A. (2007). *Suelos de Tabasco: su uso y manejo sustentable*. Colegio de Postgraduados-ISPROTAB-FUPROTAB. Villahermosa, Tabasco, México, 195.

- Peralta-Carreta, C., Gallardo-Cruz, J. A., Solórzano, J. V., & Hernández-Gómez, M. (2019). Clasificación del uso de suelo y vegetación en áreas de pérdida de cobertura arbórea (2000–2016) en la cuenca del río Usumacinta. *Madera y Bosques*, 25 (3), e2531779 <http://doi:10.21829/myb.2019.2531779>
- Perumal, K., & Bhaskaran, R. (2010). Supervised classification performance of multispectral images.
- Peters, A. J., Walter-Shea, E. A., Ji, L., Vina, A., Hayes, M., & Svoboda, M. D. (2002). Drought monitoring with NDVI-based standardized vegetation index. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 68(1), 71-75. ISSN 0099-1112
- Pineda-Pastrana, O. (2011). Análisis de cambio de uso de suelo mediante percepción remota en el municipio de Valle de Santiago (tesis de maestría). Centro de Investigación en Geografía y Geomática Ing. Jorge L. Tamayo, A. C., México, DF, México.
- Qiu, S., Zhu, Z., Olofsson, P., Woodcock, C. E., & Jin, S. (2023). Evaluation of Landsat image compositing algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 285, 113375. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113375>
- R V, A M, S V, R P (2020) Unsupervised ISODATA algorithm classification used in the landsat image for predicting the expansion of Salem urban, Tamil Nadu. *Indian Journal of Science and Technology* 13(16): 1619-1629. <https://doi.org/10.17485/IJST/v13i16.271>
- Ramírez-García, A. R., Zavala-Cruz, J., Rincón-Ramírez, J. A., Guerrero-Peña, A., García López, E., Sánchez-Hernández, R., ... Ortiz-Pérez, M. A. (2022). Cambio de uso agrícola y vegetación (1947-2019) en la región de Los Ríos, Tabasco, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 28 (3), 465-481. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2022.01.001>
- Revuelta-Acosta, J. D., Garrido-Melendez, J., Escobedo-Trujillo, B. A., & Alcalá, G. (2023). LULC Evolution of Southeast Mexico Based on Geographical Information Systems and Remote Sensing. In *Congress on Research, Development, and Innovation in Renewable Energies: Selected Papers from CIDiER 2022* (pp. 89-106). Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-26813-7\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-031-26813-7_6)

	<p>Reynolds, J.F., Stafford Smith, D.M., Lambin, E.F., Turner, B.L., II, Mortimore, M., Batterbury, S.P.J. 2007. Global desertification: Building a science for dryland development. <i>Science</i> 316, 847-851. <a href="https://doi:10.1126/science.1131634">https://doi:10.1126/science.1131634</a></p> <p>Reynoso Santos, Roberto, Valdez Lazalde, José René, Escalona Maurice, Miguel Jorge, &amp; de los Santos Posadas, Héctor Manuel. (2015). Análisis de la dinámica del uso del suelo de la cuenca Metztlán en Hidalgo, México. <i>Ingeniería Hidráulica y Ambiental</i>, 36 (3), 102-111. <a href="http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&amp;pid=S1680-03382015000300008&amp;lng=es&amp;tlng=pt">http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&amp;pid=S1680-03382015000300008&amp;lng=es&amp;tlng=pt</a>.</p> <p>Richards, J.A., Jia, X., 2006. <i>Remote Sensing Digital Image Analysis-Hardback</i>. Springer, Berlin/Heidelberg.</p> <p>Richards, JA (2022). Técnicas de clasificación supervisada. En: <i>Análisis de imágenes digitales mediante teledetección</i>. Springer, Cham. <a href="https://doi.org/10.1007/978-3-030-82327-6_8">https://doi.org/10.1007/978-3-030-82327-6_8</a></p> <p>Rodríguez-Valero, M.I., &amp; Alonso-Sarria, F. (2021). Obtención de cartografías de usos y coberturas del suelo de la demarcación hidrográfica del Segura para el periodo 1986-2019, empleando teledetección y clasificación digital de imágenes. <i>Papeles de Geografía</i>, 67, pp. 45-65. <a href="https://doi.org/10.6018/geografia.472241">https://doi.org/10.6018/geografia.472241</a></p> <p>Rullán-Silva, CD, Gama-Campillo, LM, Galindo-Alcántara, A, &amp; Olthoff, AE. (2011). Clasificación no supervisada de la cobertura de suelo de la región Sierra de Tabasco mediante imágenes LANDSAT ETM+. <i>Universidad y ciencia</i>. <a href="http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&amp;pid=S0186-29792011000100003&amp;lng=es&amp;tlng=es">http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&amp;pid=S0186-29792011000100003&amp;lng=es&amp;tlng=es</a>.</p> <p>Rwanga, S. S., &amp; Ndambuki, J. M. (2017). Accuracy assessment of land use/land cover classification using remote sensing and GIS. <i>International Journal of Geosciences</i>, 8(04), 611. <a href="https://doi10.4236/ijg.2017.84033">https://doi10.4236/ijg.2017.84033</a></p> <p>Rzedowsky, J. (1998). <i>Vegetación potencial de México, modificado de CONABIO</i>, 2008 Ciudad de México.</p> <p>Saco, P. M., Moreno-de las Heras, M., Keesstra, S., Baartman, J., Yetemen, O., &amp; Rodríguez, J. F. (2018). Vegetation and soil degradation in drylands: non linear</p>
--	--

feedbacks and early warning signals. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 5, 67-72. doi.org/10.1016/j.coesh.2018.06.001

Sahebjalal, E., & Dashtekian, K. (2013). Analysis of land use-land covers changes using normalized difference vegetation index (NDVI) differencing and classification methods. *African Journal of Agricultural Research*, 8(37), 4614-4622. <https://doi:10.5897/AJAR11.1825>

Sánchez-Hernández, Rufo, Mendoza-Palacios Juan Enrique, De la Cruz Reyes Juan de Dios, Mendoza Martínez Julio Cesar & Ramos-Reyes, Rodimiro. (2013). Mapa de erosión potencial en la cuenca hidrológica Grijalva-Usumacinta México mediante el uso de SIG. *Universidad y ciencia*, 29 (2), 153-161.

SERNAPAM 2013. Programa de Ordenamiento Ecológico del Estado de Tabasco. Secretaría de Recursos Naturales y Protección Ambiental. Gobierno del Estado de Tabasco. D.F. México. [https://tabasco.gob.mx/sites/default/files/sites/default/files/public\\_files/POET2013.pdf](https://tabasco.gob.mx/sites/default/files/sites/default/files/public_files/POET2013.pdf).

Shalaby A, Tateishi R. Remote sensing and GIS for mapping and monitoring land cover and land-use changes in the Northwestern coastal zone of Egypt. *Applied Geography*. 2007 ;27(1):28–41. <https://doi:10.1016/j.apgeog.2006.09.004>.

Sisodia, P. S., Tiwari, V., & Kumar, A. (2014, May). Analysis of supervised maximum likelihood classification for remote sensing image. In *International conference on recent advances and innovations in engineering (ICRAIE-2014)* (pp. 1-4). IEEE. <https://doi:10.1109/ICRAIE.2014.6909319>.

Sun, J., & Qin, X. (2016). Precipitation and temperature regulate the seasonal changes of NDVI across the Tibetan Plateau. *Environmental Earth Sciences*, 75(4). <https://doi:10.1007/s12665-015-5177-x>

Tobar-Díaz, R., Gao, Y., Mas, J. F., & Cambrón-Sandoval, V. H. (2023). Clasificación de uso y cobertura del suelo a través de algoritmos de aprendizaje automático: revisión bibliográfica. *Revista de Teledetección* (62), 1-19. <https://doi.org/10.4995/raet.2023.19014>

Topaloğlu, R. H., Sertel, E., & Musaoğlu, N. (2016). Assessment of classification accuracies of sentinel-2 and landsat-8 data for land cover / use mapping. *The*

International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, XLI-B8, 1055–1059. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B8-1055-2016>

Trujillo Jiménez, Magda Alexandra; Liberoff, Ana Laura; Pessacg, Natalia Liz; Pacheco, Cristian; Diaz, Lucas; SatRed: New classification land use/land cover model based on multi-spectral satellite images and neural networks applied to a semiarid valley of Patagonia; Elsevier Science; Remote Sensing Applications: Society and Environment; 26; 4-2022; 1-17 <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100703>

Tudela, F. 1989. La modernización forzada del trópico: el caso de Tabasco, Proyecto Integrado del Golfo. El Colegio de México, Federación Internacional de Institutos de Estudios Avanzados, Instituto de Investigaciones de las Naciones Unidas para el Desarrollo Social, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. D.F. México, México.

Tziolas, N., Tsakiridis, N., Ogen, Y., Kalopesa, E., Ben-Dor, E., Theocharis, J. y Zalidis, G. (2020). Una metodología integrada que utiliza bibliotecas espectrales de suelo abiertas y datos de observación de la Tierra para estimaciones de carbono orgánico del suelo en apoyo de los ODS relacionados con el suelo. Teledetección del medio ambiente, 244, 111793.

Vaca, R. A., Golicher, D. J., Rodiles-Hernández, R., Castillo-Santiago, M. Á., Bejarano, M., & Navarrete-Gutiérrez, D. A. (2019). Drivers of deforestation in the basin of the Usumacinta River: Inference on process from pattern analysis using generalised additive models. Plos One, 14 (9). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0228328>

Vega Guzmán, Álvaro, López-García, José, & Manzo Delgado, Lilia de Lourdes. (2008). Análisis espectral y visual de vegetación y uso del suelo con imágenes Landsat ETM+ con apoyo de fotografías aéreas digitales en el Corredor Biológico Chichinautzin, Morelos, México. Investigaciones geográficas (67), 59-75. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-46112008000300005&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112008000300005&lng=es&tlng=es)

- Wang, B.; Yao, Y. Mountain Vegetation Classification Method Based on Multi-Channel Semantic Segmentation Model. 2024, *Remote Sens.* 16, 256. <https://doi.org/10.3390/rs16020256>
- Ward, J. H. (1963). Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function. *Journal of the American Statistical Association*, 58(301), 236–244. <https://doi.org/10.1080/01621459.1963.10500845>
- Wu, C., & Murray, A. T. (2003). Estimating impervious surface distribution by spectral mixture analysis. *Remote sensing of Environment*, 84(4), 493-505. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00136-0](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00136-0)
- Yacouba, D., Guangdao, H., & Xingping, W. (2009). Assessment of land use cover changes using NDVI and DEM in Puer and Simao counties, Yunnan Province, China. *World rural observations*, 1(2), 1-11.
- Yang, H.X., Zhang, X.K., Xu, M.Y., Shao, S., Wang, X., Liu, W.Q., Wu, D.Q., Ma, Y.Y., Bao, Y.L., Zhang, X.L., Liu, H.J., 2020. Hyper-temporal remote sensing data in bare soil period and terrain attributes for digital soil mapping in the Black soil regions of China. *Catena* 184, 104259. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104259>
- Yasin HE, & Kornel, E. C. (2024). Evaluación de la clasificación de imágenes de satélite: exploración de métodos y técnicas. *IntechAbierto*. <https://doi:10.5772/intechopen.1003196>
- Zubaidi, E. A., & Al Khafaji, R. (2024). Unsupervised Classification of Landsat-8 Satellite Imagery-Based on ISO Clustering. *Wasit Journal of Computer and Mathematics Science*, 3(1), 40-53. <https://doi.org/10.31185/wjcms.212>
- Zhang, X., Wang, D., Hao, H., Zhang, F., & Hu, Y. (2017). Effects of Land Use/Cover Changes and Urban Forest Configuration on Urban Heat Islands in a Loess Hilly Region: Case Study Based on Yan'an City, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14 (8), 840. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph14080840>
- Zhang, X., Yan, G., Li, Q., Li, ZL, Wan, H. y Guo, Z. (2006). Evaluación de la fracción de cobertura vegetal basada en el modelo de corrección de escala espacial NDVI. *Revista Internacional de Percepción Remota*, 27 (24), 5359-5372. <https://doi:10.1080/01431160600658107>

Zhang, X., Zhao, T., Xu, H., Liu, W., Wang, J., Chen, X., and Liu, L. (2023). GLC\_FCS30D: The first global 30-m land-cover dynamic monitoring product with a fine classification system from 1985 to 2022 using dense time-series Landsat imagery and continuous change-detection method. *Earth System Science Data Discussions*, 1-32. <https://doi.org/10.5194/essd-2023-3201>.

Zhao, Q., Liu, S., Deng, L., Dong, S., Yang, Z. y Yang, J. (2012). Cambio de paisaje y alteración hidrológica asociados con la construcción de presas. *Revista Internacional de Geoinformación y Observación Aplicada de la Tierra*, 16, 17-26. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.11.009>

Altamirano, A., Miranda, A., Aplin, P., Carrasco, J., Catalán, G., Cayuela, L., Fuentes-Castillo, T., Hernández, A., Martínez-Harms, M., Peluso, F., Prado, M., Reyes-Riveros, R., Van Holt, T., Vergara, C., Zamorano-Elgueta, C., & Di Bella, C. (2020). Natural forests loss and tree plantations: large-scale tree cover loss differentiation in a threatened biodiversity hotspot. *Environmental Research Letters*, 15. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abca64>.

Amaya-Márquez, P. S., Girón-Pucha, B. L., Maza-Maza, J. E., & Luna, A. (2024). Análisis multitemporal del cambio de uso del suelo en la cuenca del río Zarumilla: Proyecciones al 2040. *Revista Digital Novasinergia*, 7(2), 73-86. <https://doi.org/10.37135/ns.01.14.05>

Campbell, M. J., Dennison, P. E., Tune, J. W., Kannenberg, S. A., Kerr, K. L., Coddling, B. F., & Anderegg, W. R. (2020). A multi-sensor, multi-scale approach to mapping tree mortality in woodland ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 245, 111853. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111853>

Castellanos-Navarrete, A., de Castro, F., & Pacheco, P. (2021). The impact of oil palm on rural livelihoods and tropical forest landscapes in Latin America. *Journal of Rural Studies*, 81, 294-304. <https://doi.org/10.37135/ns.01.14.05>

Chen, S., Zhuang, Q., Taheripour, F., Yuan, Y., & Benavidez, L. (2025). Assessment of global land cover changes using satellite data: intermittent and long-term land cover changes from 2001 to 2020. *Environmental Research Letters*, 20(3), 034045. DOI: 10.1088/1748-9326/adb5a3

- Cruz-Paz, G., Castillo, M. M., Espinoza-Tenorio, A., Bravo-Peña, L. C., Valencia Barrera, E., & Mesa-Jurado, M. A. (2018). Áreas prioritarias de conservación en la cuenca Usumacinta. La aplicación de un enfoque multicriterio. *Investigaciones geográficas*, (97). <https://doi.org/10.14350/rig.59482>
- Barrera-Mejía, H., & Valle, C. R. A. (2020). El contexto actual del ordenamiento territorial y ecológico en México. *Espacio Diseño*, (286-287), 60-66.
- Davis, K., Koo, H., Dell'Angelo, J., D'Odorico, P., Estes, L., Kehoe, L., Kharratzadeh, M., Kuemmerle, T., Machava, D., Pais, A., Ribeiro, N., Rulli, M., & Tatlhego, M. (2020). Tropical forest loss enhanced by large-scale land acquisitions. *Nature Geoscience*, 13, 482-488. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0592-3>.
- Dwomoh, F. K., & Auch, R. F. (2024). Characterization of Change in Tree Cover State and Condition over the Conterminous United States. *Forests*, 15(3), 470. <https://doi.org/10.3390/f15030470>
- Ellison, D., Pokorný, J., & Wild, M. (2024). Even cooler insights: On the power of forests to (water the Earth and) cool the planet. *Global change biology*, 30(2), e17195. <https://doi.org/10.1111/gcb.17195>
- Giam, X. (2017). Global biodiversity loss from tropical deforestation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114, 5775 - 5777. <https://doi.org/10.1073/pnas.1706264114>.
- Eastman, J. R. 2024. *TerrSet Libera GIS. Geospatial monitoring and modelling system. Manual.* Clark University. <https://s45055.pcdn.co/centers/geospatial-analytics/www-content/blogs.dir/7/files/sites/354/2024/11/Terrset-liberaGIS-Manual.pdf>
- Estrada-Loreto, F., Barba Macías, E., & Ramos Reyes, R. (2013). Cobertura temporal de los humedales en la cuenca del Usumacinta, Balancán, Tabasco, México. *Universidad y ciencia*, 29(2), 141-151. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0186-29792013000200004&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-29792013000200004&lng=es&tlng=es).
- Gallardo-Cruz, J.A., Fernández-Montes de Oca, A., Rives, C. (2019). Detección de amenazas y oportunidades para la conservación en la cuenca baja del Usumacinta a

partir de técnicas de percepción remota. *Ecosistemas*, 28(2): 82-99. DOI: 10.7818/ECOS.1611

García-Reséndez, E. R., Anaya-Corona, M., & Bollo-Manent, M. (2023). Ordenamientos ecológicos locales en Jalisco, México: impedimentos para su expedición. *Sociedad Y Ambiente*, (26), 1–26. <https://doi.org/10.31840/sya.vi26.2620>

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote sensing of Environment*, 202, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>

Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., ... & Townshend, J. R. (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 342(6160), 850-853. DOI:10.1126/science.1244693

Hansen, M. C., Stehman, S. V., & Potapov, P. V. (2010). Quantification of global gross forest cover loss. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(19), 8650-8655. <https://doi.org/10.1073/pnas.0912668107>

Hernández-Rojas, D. A., López-Barrera, F., & Bonilla-Moheno, M. (2018). Análisis preliminar de la dinámica de uso del suelo asociada al cultivo palma de aceite (*Elaeis guineensis*) en México. *Agrociencia*, 52(6), 875–893. <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v52n6/2521-9766-agro-52-06-875.pdf>

Hewson, J., Crema, S. C., González-Roglich, M., Tabor, K., & Harvey, C. A. (2019). New 1 km Resolution Datasets of Global and Regional Risks of Tree Cover Loss. *Land*, 8(1), 14. <https://doi.org/10.3390/land8010014>

Hoang, N., & Kanemoto, K. (2021). Mapping the deforestation footprint of nations reveals growing threat to tropical forests. *Nature Ecology & Evolution*, 5, 845 - 853. <https://doi.org/10.1038/s41559-021-01417-z>.

Isaac-Márquez, R., de Jong, B., Eastmond, A., Ochoa-Gaona, S., Hernández, S., & Kantún, M. D. (2005). Estrategias productivas campesinas: un análisis de los factores condicionantes del uso del suelo en el oriente de Tabasco, México. *Universidad y Ciencia*, 21(42), 57-73.

Jácome-Flores, M.E., Popoca-Cruz, P.E. and Sanaphre-Villanueva, L. (2024). Not only biology matters: socioeconomic factors change land prioritization for restoration. *Restoration Ecology*, 32: e14059. <https://doi.org/10.1111/rec.14059>

Jones, J. A., Wei, X., Archer, E., Bishop, K., Blanco, J. A., Ellison, D., ... & Creed, I. F. (2020). Forest-Water Interactions Under Global Change. In: Levia, D.F., Carlyle-Moses, D.E., Iida, S., Michalzik, B., Nanko, K., Tischer, A. (eds) *Forest-Water Interactions. Ecological Studies*, vol 240. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-26086-6\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-030-26086-6_24)

Keenan, R. J., Reams, G. A., Achard, F., de Freitas, J. V., Grainger, A., & Lindquist, E. (2015). Dynamics of global forest area: Results from the FAO Global Forest Resources Assessment 2015. *Forest ecology and management*, 352, 9-20. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.06.014>

Jiménez, L. N. L. (2019). Tabasco es el edén de los humedales. *Emerging Trends in Education*, 25(52), 4.

Maldonado-Sánchez, E. A., Ochoa-Gaona, S., Ramos-Reyes, R., Guadarrama-Olivera, M. D. L. A., González-Valdivia, N., & de Jong, B. H. (2016). La selva inundable de canacoite en Tabasco, México, una comunidad vegetal amenazada. *Acta botánica mexicana*, (115), 75-101.

Mashala, M., Dube, T., Mudereri, B., Ayisi, K., & Ramudzuli, M. (2023). A Systematic Review on Advancements in Remote Sensing for Assessing and Monitoring Land Use and Land Cover Changes Impacts on Surface Water Resources in Semi-Arid Tropical Environments. *Remote. Sensing*, 15, 3926. <https://doi.org/10.3390/rs15163926>.

March-Mifsut, I., Castro, M. (2010). La cuenca del río Usumacinta: Perfil y perspectivas para su conservación y desarrollo sustentable. In: Cotler H (ed) *Las cuencas hidrográficas de México: Diagnóstico y priorización*. Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAT; Fundación Gonzalo Río Arronte I. A. P., Mexico City, Mexico.

Palomeque-de la Cruz, M. Ángel, Ruíz-Acosta, S. del C., Núñez-Magaña, T. G., Ramos-Reyes, R., Galindo-Alcántara, A., & Magaña-Alejandro, M. A. (2025).

	<p>Modeling of Land use Change and Projection in Tenosique, Tabasco, Mexico. <i>Revista Terra Latinoamericana</i>, 43. <a href="https://doi.org/10.28940/terra.v43i.1821">https://doi.org/10.28940/terra.v43i.1821</a></p> <p>Parada-Alzate, L. M., Andramunio-Acero, C. P., López-Muñoz, M. T., Rondón-Martínez, Y. F., &amp; Moreno-Pérez, L. A. (2024). Zonificación de Altos Valores de Conservación (AVC) del Complejo Cenagoso de Zapatosa (Colombia) a partir de una evaluación multicriterio. <i>Investigaciones geográficas</i>, (115). <a href="https://doi.org/10.14350/rig.60945">https://doi.org/10.14350/rig.60945</a></p> <p>Peralta-Carreta, C., García-Hidalgo, G., Gallardo-Cruz, J. A., Medrano-Pérez, O. R., &amp; Charruau, P. (2025). Remote sensing applied to the morphodynamics of the meandering Usumacinta River in the period 1986-2019. <i>Revista Brasileira De Geomorfologia</i>, 26(1). <a href="https://doi.org/10.20502/rbg.v26i1.2560">https://doi.org/10.20502/rbg.v26i1.2560</a></p> <p>Peralta-Carreta, C., Medrano-Pérez, O.R., Alcudia-Aguilar, A., Pham, Q.B., &amp; Megia-Vera, H.J. (2025a). Spatial Distribution of Relict Inland Mangrove (<i>Rhizophora mangle</i> L.) in the San Pedro River Basin: A Transboundary Analysis between Mexico and Guatemala. <i>Estuaries and Coasts</i>, 48, 59. <a href="https://doi.org/10.1007/s12237-025-01492-6">https://doi.org/10.1007/s12237-025-01492-6</a></p> <p>Peralta-Carreta, C., Gallardo-Cruz, J. A., Solórzano, J. V., &amp; Hernandez-Gómez, M. (2019). Clasificación del uso de suelo y vegetación en áreas de pérdida de cobertura arbórea (2000–2016) en la cuenca del río Usumacinta. <i>Madera Y Bosques</i>, 25(3). <a href="https://doi.org/10.21829/myb.2019.2531779">https://doi.org/10.21829/myb.2019.2531779</a></p> <p>Ramírez-García, A. R., Zavala-Cruz, J., Rincón-Ramírez, J. A., Guerrero-Peña, A., García-López, E., Sánchez-Hernández, R., ... &amp; Ortiz-Pérez, M. A. (2022). Vegetation cover and land use change (1947-2019) in the region of Los Ríos, Tabasco, México. <i>Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente</i>, 28(3), 465-481. <a href="https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2022.01.001">https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2022.01.001</a></p> <p>Ramos-Reyes, R. &amp; Palomeque de la Cruz, M.A. (2023): Cambio de uso del suelo y escenarios prospectivos en el Estado de Tabasco (México). <i>Anales de Geografía de la Universidad Complutense</i>, 43(1), 185-209.</p> <p>Reyes Grande, F. (2015). ¿Sustentabilidad versus subsistencia? Un estudio de caso dentro del Área Natural Protegida Cañón del Usumacinta. <i>Relaciones. Estudios de</i></p>
--	--

	<p>Historia y Sociedad, 36(142), 261–305.  <a href="https://www.scielo.org.mx/pdf/rz/v36n142/0185-3929-rz-36-142-00261.pdf">https://www.scielo.org.mx/pdf/rz/v36n142/0185-3929-rz-36-142-00261.pdf</a></p> <p>Reynoso-Santos, R., Valdez-Lazalde, J. R., Escalona-Maurice, M. J., de los Santos-Posadas, H.M. &amp; Pérez-Hernández, M. J. (2016): Cadenas de Markov y autómatas celulares para la modelación de cambio de uso de suelo. <i>Ingeniería hidráulica y ambiental</i>, 37(1), 72-81. <a href="https://ojs2.fch.unicen.edu.ar/ojs-3.1.0/index.php/estudiossocioterritoriales/article/view/289">https://ojs2.fch.unicen.edu.ar/ojs-3.1.0/index.php/estudiossocioterritoriales/article/view/289</a></p> <p>Riley, C. B., &amp; Gardiner, M. M. (2020). Examining the distributional equity of urban tree canopy cover and ecosystem services across United States cities. <i>PLoS One</i>, 15(2), e0228499. <a href="https://doi.org/10.1371/journal.pone.0228499">https://doi.org/10.1371/journal.pone.0228499</a></p> <p>San Pallo, M. G., Muñoz, D. E. R., Jurado, M. A. M., &amp; Perera, M. Á. D. (2019). Informes de gobierno y paisaje forestal en Tabasco y Chiapas de 1947 a 1982. <i>EntreDiversidades. Revista de ciencias sociales y humanidades</i>, (13), 233-262.</p> <p>Senior, R.A., Hill, J.K. &amp; Edwards, D.P. (2019). Global loss of climate connectivity in tropical forests. <i>Nature Climate Change</i>, 9, 623–626. <a href="https://doi.org/10.1038/s41558-019-0529-2">https://doi.org/10.1038/s41558-019-0529-2</a></p> <p>Sloan, S., &amp; Sayer, J. (2015). Forest Resources Assessment of 2015 shows positive global trends but forest loss and degradation persist in poor tropical countries. <i>Forest Ecology and Management</i>, 352, 134-145. <a href="https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2015.06.013">https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2015.06.013</a>.</p> <p>Soasores, D. &amp; Garcia-Garcia, A. (2017). Vision climatica de la precipitacion en la cuenca del río Usumacinta. La cuenca del río Usumacinta desde la perspectiva del cambio climatico. Mexico: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.</p> <p>Srisunthon, P., &amp; Chawchai, S. (2020). Land-use changes and the effects of oil palm expansion on a peatland in southern Thailand. <i>Frontiers in Earth Science</i>, 8, 559868. <a href="https://doi.org/10.3389/feart.2020.559868">https://doi.org/10.3389/feart.2020.559868</a></p> <p>Timilsina, S., Aryal, J., &amp; Kirkpatrick, J. B. (2020). Mapping Urban Tree Cover Changes Using Object-Based Convolution Neural Network (OB-CNN). <i>Remote Sensing</i>, 12(18), 3017. <a href="https://doi.org/10.3390/rs12183017">https://doi.org/10.3390/rs12183017</a></p> <p>Tyukavina, A., Baccini, A., Hansen, M., Potapov, P., Stehman, S., Houghton, R., Krylov, A., Turubanova, S., &amp; Goetz, S. (2015). Aboveground carbon loss in natural</p>
--	--

and managed tropical forests from 2000 to 2012. Environmental Research Letters, 10. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/7/074002>.

Vázquez-Negrín I, Castillo-Acosta O, Valdez-Hernández JI, Zavala-Cruz J, Martínez-Sánchez JL. 2011. Estructura y composición florística de la selva alta perennifolia en el ejido Niños Héroes Tenosique, Tabasco, México. Polibotánica 32: 41-61.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México