

Cambio de uso del suelo e intensificación de la vulnerabilidad climática en zonas costeras: un enfoque geoespacial en el sureste mexicano

Land use change and intensification of climate vulnerability in coastal zones: a geospatial approach in southeastern Mexico

Sugey Isabela Izaguirre de la Cruz¹, Ana Rosa Rodríguez Luna^{1*}, Eduardo Salvador López Hernández¹

¹ Cuerpo académico de investigación socioambiental para la sustentabilidad, División académica de ciencias biológicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Villahermosa, Tabasco, México. CP. 86150, Tel. (993) 3581500 Ext. 6400.
ARL04966@docente.ujat.mx.

*Autor de correspondencia

Resumen

Palabras clave:

Clima; cobertura;
costas; SIG.

Esta investigación analiza los cambios en la cobertura del suelo y su relación con la vulnerabilidad climática en las costas de Tabasco, México, mediante un estudio multitemporal (1994–2023) con imágenes Landsat y SIG. Los resultados revelan una transformación significativa: reducción del 42% en manglares, aumento del 210% en asentamientos humanos y conversión de 755.5 ha de pastizales a zonas industriales (hidrocarburos). Esto incrementa la vulnerabilidad local a inundaciones y la pérdida de servicios ecosistémicos clave, como regulación hídrica y captura de carbono. La clasificación supervisada mostró una exactitud del 85.5%–85.8%, confirmando cambios acelerados: +11.01% anual en industria y +6.08% en asentamientos. Los hallazgos destacan la necesidad de políticas que integren ordenamiento territorial con adaptación climática, corredores ecológicos y evaluaciones de impacto ambiental. Los datos subrayan la necesidad de preservar ecosistemas costeros urgentemente para mitigar riesgos climáticos en contextos de presión antropogénica.

Abstract

Keywords: Climate;
coverage; costs; GIS.

This research analyzes land cover changes and their relationship with climate vulnerability in coastal Tabasco, Mexico, through a multi-temporal study (1994–2023) using Landsat images and GIS. Results reveal a significant transformation: 42% reduction in mangroves, 210% increase in human settlements, and conversion of 755.5 ha of grasslands to industrial (hydrocarbon) zones. This increases local vulnerability to flooding and the loss of key ecosystem services, such as water regulation and carbon sequestration. The supervised classification showed an accuracy of 85.5%–85.8%, confirming accelerated changes: +11.01% per year in industry and +6.08% in settlements. Findings highlight the need for policies that integrate land-use planning with climate adaptation, ecological corridors, and environmental impact assessments. The data underscore the urgent need to preserve coastal ecosystems to mitigate climate risks in contexts of anthropogenic pressure.

Recibido: 10 de junio de 2025

Aceptado: 31 de agosto de 2025

Publicado: 25 de febrero de 2026

Cómo citar: Izaguirre, S. I.; Rodríguez, A. R.; & López, E. S. (2026). Cambio de uso del suelo e intensificación de la vulnerabilidad climática en zonas costeras: un enfoque geoespacial en el sureste mexicano. *Acta Universitaria*, 36, e4682. doi: <https://doi.org/10.15174/au.2026.4682>

Introducción

El cambio climático se ha caracterizado por ser uno de los retos más significativos para la humanidad en las décadas recientes, generando efectos que difieren dependiendo de las particularidades geográficas y socioeconómicas de cada zona. Las áreas más impactadas son las zonas costeras, donde los efectos son más severos debido a su constante exposición a fenómenos como el aumento del nivel del mar, la erosión de las costas y la infiltración de sal en acuíferos y suelos. A estos elementos naturales se añaden las presiones crecientes derivadas de las actividades antropogénicas, tales como el establecimiento de asentamientos humanos irregulares y las grandes alteraciones en el uso del suelo (Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], 2018; Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2022; Neumann *et al.*, 2015).

México posee más de 11 000 kilómetros de litoral, que afrontan retos en aumento debido a las consecuencias combinadas del cambio climático y la actividad humana. Específicamente, el estado de Tabasco sobresale como una zona crítica por sus particularidades geomorfológicas, como llanuras bajas, una amplia red de ríos y la degradación de ecosistemas costeros, tales como manglares y humedales (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2022), circunstancias que han aumentado su exposición a fenómenos hidrometeorológicos extremos, cuyos efectos se han agudizado en los últimos años.

Además de los fenómenos naturales, la transformación del paisaje en Tabasco obedece fundamentalmente a presiones de origen antropogénico. Factores como la expansión agropecuaria, la tala selectiva y, particularmente, el desarrollo de la infraestructura energética asociada a la política de la autogestión petrolera, han conducido a la degradación del suelo, la merma de la cobertura vegetal y la alteración de los servicios ecosistémicos (Antúnez, 2024; Palma-López *et al.*, 2017). Estas modificaciones reducen drásticamente la capacidad de adaptación de las comunidades locales, cuyas formas de subsistencia dependen directamente de los recursos naturales.

Estudios previos han documentado una significativa reducción de las áreas naturales -en particular de los manglares- en los ecosistemas costeros del sureste de México. Esta pérdida contrasta con el acelerado crecimiento de los asentamientos humanos e industriales en la región (Cortés-Gómez *et al.*, 2023; Ibarrarán *et al.*, 2009). Esta situación remarca la urgencia de fortalecer políticas que concilien el desarrollo económico con la protección ambiental, especialmente en contextos donde la resiliencia depende de la integridad de los ecosistemas.

Por lo tanto, esta investigación emplea tecnologías geoespaciales (sistemas de información geográfica [SIG] e imágenes satelitales multitemporales) para analizar los cambios en la cobertura y uso de suelo en la región costera del municipio de Paraíso, Tabasco. El estudio se centra en las transformaciones ocurridas tras el establecimiento del pozo petrolero Tajón, el cual detonó un rápido proceso de reorganización territorial, dinámicas que muestran cómo el crecimiento económico basado en la producción petrolera en zonas ecológicamente vulnerables puede alterar los patrones de ocupación del espacio y aumentar los riesgos climáticos (Herrera-García *et al.*, 2020).

La interrogante principal que orienta esta investigación es: ¿De qué manera los cambios en la cobertura y uso de suelo ocurridos entre 1994 y 2023 han influido en la vulnerabilidad climática de Las Flores y cuáles son sus implicaciones para la planificación territorial? A partir de este cuestionamiento, el objetivo es analizar la dinámica de transformación del territorio en un contexto de presión petrolera y ambiental, con el fin de identificar cómo las modificaciones en la cobertura y uso del suelo inciden en la exposición de la comunidad a riesgos climáticos. De esta manera, se busca generar evidencia científica que contribuya al diseño de estrategias de ordenamiento territorial más sostenibles, que integren tanto la dimensión ambiental como la social.

Materiales y métodos

Área de estudio

Este estudio se llevó a cabo en la zona costera del municipio de Paraíso, Tabasco, específicamente en la ranchería Las Flores 3^{ra} Sección, situada en las coordenadas 18° 25' 29" N y 93° 16' 37" O. Esta área forma parte del sistema río Grijalva-Usumacinta, distinguido por su topografía plana con inclinaciones inferiores al 2% y una altitud media de solo 2 m. s. n. m. (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2017). Su geomorfología está regida por recientes depósitos aluviales, con terrenos gleysoles y vertisoles de textura arcillosa que enfrentan dificultades en el drenaje natural (Palma-López *et al.*, 2017). Estas condiciones físicas, sumadas a su ubicación en una planicie costera, hacen del área de estudio un territorio altamente vulnerable a inundaciones, erosión y aumento del nivel del mar. Además, la proximidad a zonas de explotación petrolera y pérdida progresiva de los ecosistemas de manglar incrementan su vulnerabilidad socioambiental, convirtiéndola en un caso representativo de los desafíos que enfrentan las comunidades costeras del sureste mexicano ante el cambio climático.

En términos climáticos, la región exhibe condiciones propias del trópico húmedo, con una temperatura promedio anual de 26.4 °C y lluvias que exceden los 2000 mm anuales, concentradas mayormente entre junio y octubre (Del Angel-Meraz *et al.*, 2009). La hidrología de la zona se ve profundamente impactada por la confluencia de sistemas de lagunas costeras, canales de ríos y la dinámica de mareas del Golfo de México, lo que la vuelve especialmente susceptible a inundaciones y procesos de salinización (Álvarez-Soberano & Medrano-Pérez, 2020).

Desde una perspectiva socioambiental, la comunidad ha experimentado una rápida transformación en su territorio en los últimos 30 años. Esto se atribuye principalmente al aumento de la población en el área de estudio, la edificación de infraestructuras industriales y la disminución progresiva de importantes ecosistemas costeros, como los manglares. Estos elementos promueven el análisis de la cobertura y uso del suelo a través del tiempo y el espacio, dado que son cruciales para comprender cómo se generan la vulnerabilidad y la adaptación al cambio climático.

Materiales

Para realizar esta investigación se empleó un ordenador con habilidades de procesamiento gráfico y conexión a internet, lo que facilitó la ejecución de *software* especializado y la descarga de la información geoespacial necesaria. Se emplearon imágenes satelitales provenientes de los sensores Landsat 5 TM (año 1994) y Landsat 8 OLI (año 2023), adquiridas del repositorio del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), específicamente las correspondientes al *Path/Row* 22-47 con un índice de nubosidad inferior al 10% y previamente procesadas con corrección atmosférica y geométrica (nivel L2SP).

Se empleó el *software* QGIS en dos versiones para el procesamiento y análisis de los datos: 1) la versión 3.28.10 "Firenze", que incluye los complementos *Semi-Automatic Classification Plugin* (SCP) y *AcATaMa*; y 2) la versión 2.18.0 "Las Palmas", que incluye los módulos para la evaluación de cambios en la cobertura y uso del suelo (MOLUSCE), el cual cuenta con algoritmos sofisticados para la identificación y modelación de variaciones espaciales.

Métodos

Adquisición y preprocesamiento de imágenes satelitales

Se utilizaron imágenes de los satélites Landsat 5 TM (1994) y Landsat 8 OLI (2023), siguiendo los protocolos propuestos por Zhu *et al.* (2019) para cambios en la cobertura y el uso de suelo a largo plazo. Las imágenes se tomaron durante la estación seca (marzo-abril) con el objetivo de reducir la interferencia atmosférica, siguiendo las mejores prácticas recomendadas por Feng *et al.* (2015) en investigaciones de dinámica costera. Los datos Landsat Level-2 Science Products (L2SP) empleados en este estudio abarcan correcciones atmosféricas sofisticadas, elaboradas con el algoritmo LaSRC (Level-2 Surface Reflectance Code), el cual ha sido corroborado por Roy *et al.* (2014) para investigaciones acerca del cambio de uso del suelo en zonas tropicales.

La exactitud geométrica de las imágenes (<12 m CE90) se ajusta a las normas definidas por Shaw *et al.* (2024) para análisis multitemporales. El primer procesamiento implicó un recorte espacial empleando un *shapefile* del área de estudio, de acuerdo con la metodología que describen Gorelick *et al.* (2017). Para mejorar el procesamiento de datos, se escogieron imágenes con corrección radiométrica interanual a través de pseudoinvariantes (PIF), aplicando la metodología sugerida por Chen *et al.* (2023) para investigaciones de análisis multitemporal, incrementando el contraste mediante la transformación histograma sugerida por Zhang *et al.* (2017) para imágenes Landsat.

La selección de fechas concretas se realizó considerando una cobertura nubosa inferior al 10%, siguiendo los estándares de calidad establecidos por Kovalskyy & Roy (2013). Así mismo, se priorizaron condiciones de marea similares, y se verificó la consistencia temporal mediante imágenes complementarias del satélite Sentinel-2, conforme a la metodología descrita por Fang *et al.* (2023).

Clasificación supervisada de cobertura y uso de suelo

El procedimiento de clasificación de categorías de cobertura y uso de suelo se llevó a cabo a través del algoritmo *Spectral Angle Mapper* (SAM), que está incorporado en el *Semi-Automatic Classification Plugin* (SCP) de QGIS versión 3.28.10. Este enfoque, que evalúa la semejanza angular entre las firmas espectrales de referencia y cada píxel de la imagen, ha probado ser eficaz para distinguir las coberturas de vegetación en zonas costeras, tal como señalan investigaciones de Zhang *et al.* (2017). El algoritmo fue seleccionado porque puede gestionar la variabilidad espectral natural de los ambientes costeros, lo que resulta particularmente beneficioso para distinguir entre clases con firmas espectrales similares (Wang *et al.*, 2013).

Las categorías temáticas de cobertura y uso de suelo fueron establecidas mediante un procedimiento que recurrió reiteradamente a diversas fuentes de datos, de acuerdo con las sugerencias de Rodríguez-Veiga *et al.* (2016). El procedimiento contempló un estudio minucioso de las firmas espectrales empleando las bandas de infrarrojo y visible próximas. Además, se llevó a cabo una interpretación visual basada en imágenes espaciales de alta resolución disponibles en Google Earth Pro para los dos años, realizando una comprobación en el lugar a través de un trabajo de campo efectuado en marzo de 2023, y se consultó la cartografía temática histórica del INEGI (2022).

Tabla 1. Categorías de uso y cobertura del suelo en el contexto geográfico costero.

Categoría	Abreviatura	Descripción en el contexto geográfico
Mar	MAR	Zona marina abierta adyacente a la línea costera
Laguna	LAG	Cuerpos de agua costeros con influencia marina y fluvial
Comunidad de manglar	CMA	Vegetación arbórea halófila en zonas de transición tierra-mar, reguladora de inundaciones
Línea costera	LCO	Franja de transición entre el mar y el continente, sujeta a erosión y avance marino
Pastizal	PAS	Áreas cubiertas por gramíneas naturales o inducidas, empleadas en actividades agropecuarias
Plantaciones	PLA	Superficies destinadas a cultivos comerciales o de reforestación
Industria	IND	Espacios ocupados por infraestructura y actividades petroleras e industriales
Asentamientos humanos	AHU	Áreas urbanizadas o de vivienda rural con servicios básicos

Fuente: Elaboración propia.

El índice de Jeffries-Matusita (JM) se utilizó para evaluar la separabilidad espectral entre las clases. Se garantizaron valores que superaban el 1.9 para todas las clases pares, lo cual alcanzó el límite mínimo sugerido por Richards (2022) para asegurar clasificaciones y mapas temáticos confiables.

Evaluación de precisión de la clasificación

La verificación de los mapas temáticos producidos se llevó a cabo conforme a los protocolos definidos por Olofsson *et al.* (2014) para investigaciones de cambio en la cobertura y uso del suelo. Se aplicó un método de muestreo estratificado aleatorio con 395 y 396 puntos de referencia para los años 1994 y 2023, respectivamente, repartidos proporcionalmente de acuerdo con la longitud de cada clase en el campo de estudio. De acuerdo con Dong *et al.* (2020), este método facilita la obtención de estimadores no prejuiciosos sobre la precisión de la clasificación.

Se llevó a cabo una interpretación visual para cada punto de referencia, respaldada por: 1) imágenes históricas de alta resolución disponibles en Google Earth Pro, 2) imágenes aéreas del archivo del INEGI y 3) registros de campo recogidos durante la campaña de verificación. Esta información facilitó la creación de matrices de confusión autónomas para cada fecha. Con base en ellas, se determinaron las métricas de precisión de acuerdo con las ecuaciones sugeridas por Stehman & Foody (2019). Se enfocó especialmente en el estudio de las exactitudes por clase (del productor y del usuario), dado que, según Zhu *et al.* (2019), estos indicadores son esenciales para valorar la fiabilidad de los mapas en usos particulares.

Análisis de cambio de cobertura y uso de suelo

Los resultados cuantitativos de los cambios de la cobertura y uso del suelo se llevaron a cabo a través del complemento MOLUSCE, siguiendo la metodología establecida por Muhammad *et al.* (2022). Este facilitó la creación de matrices de transición minuciosas que miden las transformaciones entre las distintas clases de cobertura durante el periodo de investigación (1994-2023). Como resaltan Kennedy *et al.* (2018), este tipo de estudio es especialmente útil para detectar rutas de cambio predominantes y procesos de transición propios de sistemas costeros. La cuantificación de las tasas de cambio se llevó a cabo a través de la fórmula estandarizada sugerida por Puyravaud (2003), la cual toma en cuenta tanto la superficie inicial y final de cada clase como el lapso temporal del análisis, siendo la fórmula particular:

$$r = \left(\frac{s_2 - s_1}{s_1} \right) \cdot \frac{100}{n}$$

donde r representa la tasa de cambio anual (%); s_1 y s_2 son las superficies (en hectáreas) de una clase de cobertura en el año inicial (1994) y final (2023), respectivamente; y n es el intervalo temporal en años (29). Este estudio permitió reconocer patrones de disminución, persistencia y crecimiento de las categorías de cambio de cobertura y uso de suelo en la región costera de investigación, con consecuencias significativas para la administración ambiental y la organización territorial local. Esta metodología, frecuentemente empleada en investigaciones recientes sobre la dinámica costera (Acosta-Velázquez *et al.*, 2023; Goldberg *et al.*, 2020), permite obtener estimaciones equiparables entre distintas regiones y lapsos temporales.

Resultados

El análisis de imágenes satelitales mostró una notable reestructuración del paisaje en el área de investigación entre 1994 y 2023. Al principio, el territorio tenía un aspecto mayoritariamente rural (Figura 1), con coberturas naturales y agroforestales. Las categorías reconocidas comprendieron el mar (MAR), la laguna (LAG), las comunidades de mangle (CMA), los pastizales (PAS), las plantaciones (PLA) (principalmente de *Cocos nucifera*) y los asentamientos humanos dispersos. Los manglares desempeñaban un papel crucial como escudos protectores frente a eventos meteorológicos extremos, mientras que las plantaciones mantenían la economía local (Ramos & Palomeque, 2023; Sánchez & Trejo, 2024).

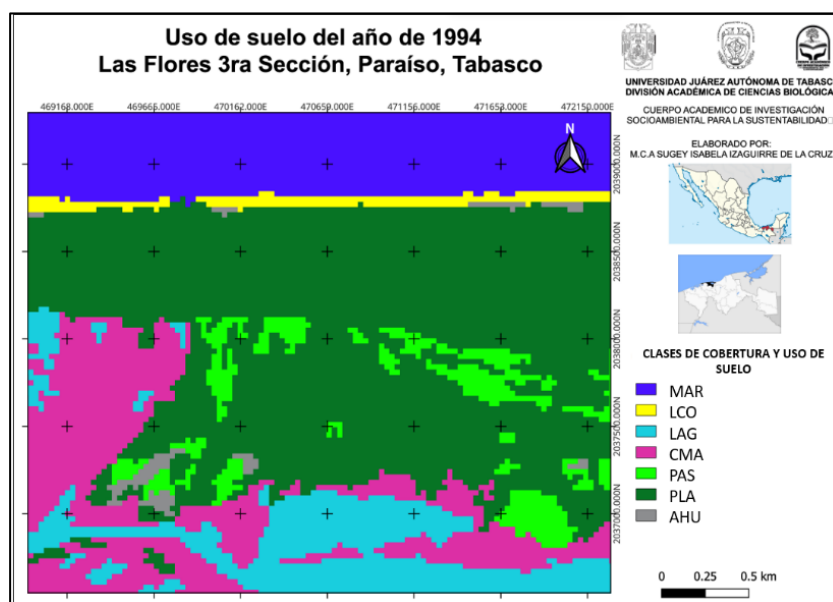


Figura 1. Cobertura y uso de suelo en el año 1994 en la rancharía Las Flores 3ª Sección, Paraíso, Tabasco. Se representan las principales clases de cobertura y uso del suelo: MAR (mar), LCO (línea costera), LAG (laguna), CMA (comunidad de mangle), PLA (plantaciones) y AHU (asentamientos humanos).

Fuente: Elaboración propia.

En 2023, el paisaje evidenció una transición hacia un modelo urbano-industrial, a causa de la expansión de la infraestructura vinculada al pozo petrolero Tajón (gestionado por PEMEX desde 2014) (Figura 2). Este procedimiento transformó pastizales y manglares en zonas industriales (IND) y urbanas, evidenciando una intensa presión humana. La disminución de vegetación contrasta con el incremento en las actividades de extracción y edificación de viviendas (Aguilar, 2024; Chan & Alejandro, 2024).

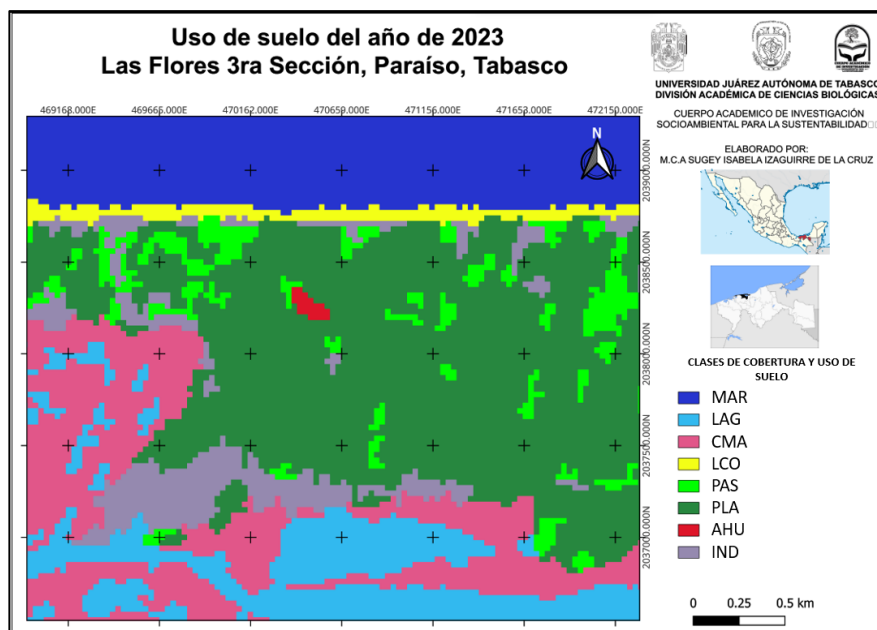


Figura 2. Cobertura y uso de suelo en el año 2023 en la ranchería Las Flores 3^{ra} Sección, Paraíso, Tabasco. Se representan las principales clases de cobertura y uso del suelo: MAR (mar), LCO (línea costera), LAG (laguna), CMA (comunidad de manglar), PLA (plantaciones), AHU (asentamientos humanos) e industria (IND).

Fuente: Elaboración propia.

Exactitud de las clasificaciones

El estudio con matrices de error evidenció una gran exactitud en los mapas producidos. En 1995, la exactitud alcanzó el 85.82% (Tabla 2), mientras que en 2023 alcanzó el 85.55% (Tabla 3). Estas medidas son estadísticamente apropiadas para investigaciones de percepción remota en diversos entornos costeros (Olofsson *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2017).

Tabla 2. Evaluación de la exactitud en el año de 1994 de la clasificación supervisada de cobertura y uso de suelo de Las Flores 3ra Sección, Paraíso Tabasco.

Matriz de error		Clases referencia (verdad-terreno)								Total	%Exactitud de Usuario	%Error comisión
		MAR	LAG	LCO	CMA	PAS	PLA	IND	AHU			
Clases espectrales (clasificación)	MAR	81	1	0	0	0	0	0	0	82	98.8	1.2
	LAG	0	44	0	6	0	0	0	0	50	88.0	12.0
	LCO	2	0	5	0	0	0	0	0	7	71.4	28.6
	CMA	0	4	0	63	0	1	0	0	68	92.6	7.4
	PAS	0	0	0	1	17	1	0	1	20	85.0	15.0
	PLA	0	1	2	17	14	125	0	5	164	76.2	23.8
	IND	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0
	AHU	0	0	0	0	0	0	0	4	4	100.0	0.0
	Total	83	50	7	87	31	127	0	10	395		
%Exactitud de productor		97.6	88.0	71.4	72.4	54.8	98.4	0.0	40.0	%Fiabilidad Global 85.82278481		
%Error omisión		2.4	12.0	28.6	27.6	45.2	1.6	0.0	60.0			

Nota. Se representan las principales clases de cobertura y uso del suelo: MAR (mar), LCO (línea costera), LAG (laguna), CMA (comunidad de manglar), PLA (plantaciones), AHU (asentamientos humanos) e industria (IND).

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Evaluación de la exactitud en el año de 2023 de la clasificación supervisada de cobertura y uso de suelo de Las Flores 3ra Sección, Paraíso, Tabasco.

Matriz de error		Clases referencia (verdad-terreno)								Total	%Exactitud de Usuario	%Error comisión
		MAR	LAG	LCO	CMA	PAS	PLA	IND	AHU			
Clases espectrales (clasificación)	MAR	86	0	1	0	0	0	0	0	87	98.9	1.1
	LAG	1	51	0	11	0	1	0	1	65	78.5	21.5
	LCO	0	0	5	0	0	0	0	0	5	100.0	0.0
	CMA	0	0	0	58	0	1	0	0	59	98.0	2.0
	PAS	0	0	0	0	24	8	0	1	33	72.7	27.3
	PLA	0	1	0	2	38	77	0	6	124	62.1	37.9
	IND	0	0	0	0	0	0	1	0	1	100.0	0.0
	AHU	0	0	0	1	3	1	0	17	22	77.3	22.7
	Total	87	52	6	72	65	88	1	25	396		
%Exactitud de productor		98.9	98.1	83.3	80.6	36.9	87.5	100.0	68.0	%Fiabilidad Global 80.55555556		
%Error omisión		1.1	1.9	16.7	19.4	63.1	12.5	0.0	32.0			

Nota. Se representan las principales clases de cobertura y uso del suelo: MAR (mar), LCO (línea costera), LAG (laguna), CMA (comunidad de manglar), PLA (plantaciones), AHU (asentamientos humanos) e industria (IND).

Fuente: Elaboración propia.

Las clases que presentaron mayor precisión fueron Mar (MAR), con valores superiores a 98% tanto en cifras de usuario y productor, y comunidad de manglar (CMA) para el año 2023, aunque esta última mostró algunos errores residuales debido a la similitud espectral con las lagunas (Dong et al., 2020). En cuanto a las Plantaciones (PLA), su precisión disminuyó en 2023 como resultado de su sustitución por áreas de asentamientos humanos.

Por otro lado, las precisiones de los pastizales (PAS) y los asentamientos humanos (AHU) fueron inferiores, a causa de su dispersión y similitud en su aspecto. Este es un inconveniente que se ha observado frecuentemente en regiones tropicales (Zhu *et al.*, 2019).

Dinámicas de cambio y tasas de transformación

Las matrices de transición resaltaban tendencias y cuantificaciones de patrones críticos (Tabla 4):

Tabla 4. Matriz de transición de cambio de cobertura y uso de suelo de 1994 a 2023 en Las Flores 3ra Sección, Paraíso, Tabasco.

Sentido de cambio	hectáreas
MAR - permanece	1117.2
MAR - LAG	0.0
MAR - LCO	721.5
MAR - CMA	0.0
MAR - PAS	0.0
MAR - PLA	1.5
MAR - IND	0.0
MAR - AHU	45.4
LAG - MAR	0.0
LAG - permanece	1033.6
LAG - LCO	0.0
LAG - CMA	271.9
LAG - PAS	0.0
LAG - PLA	10.0
LAG - IND	0.0
LAG - AHU	0.0
LCO - MAR	0.9
LCO - LAG	0.0
LCO - permanece	372.27
LCO - CMA	0.00
LCO - PAS	0.00
LCO - PLA	21.1
LCO - IND	0.00
LCO - AHU	163.6
CMA - MAR	0.00
CMA - LAG	77.2
CMA - LCO	0.00
CMA - permanece	811.1
CMA - PAS	40.3
CMA - PLA	37.8
CMA - IND	0.0
CMA - AHU	0.0
PAS - MAR	0.00

Nota. Se representan las principales clases de cobertura y uso del suelo: MAR (mar), LCO (línea costera), LAG (laguna), CMA (comunidad de manglar), PLA (plantaciones), AHU (asentamientos humanos) e industria (IND).

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Matriz de transición de cambio de cobertura y uso de suelo de 1994 a 2023 en Las Flores 3ra Sección, Paraíso, Tabasco. [Continuación].

Sentido de cambio	hectáreas
PAS - LAG	0.00
PAS - LCO	0.00
PAS - CMA	0.00
PAS - permanece	517.9
PAS - PLA	157.6
PAS - IND	755.5
PAS - AHU	72.1
PLA - MAR	0.00
PLA - LAG	3.6
PLA - LCO	0.00
PLA - CMA	15.7
PLA - PAS	439.2
PLA - permanece	777.1
PLA - IND	755.5
PLA - AHU	172.7
IND - MAR	0.00
IND - LAG	0.00
IND - LOC	0.00
IND - CMA	0.00
IND - PAS	0.00
IND - PLA	5.00
IND - permanece	0.00
IND - AHU	0.00
AHU - MAR	0.00
AHU - LAG	3.6
AHU - LOC	23.9
AHU - CMA	19.3
AHU - PAS	120.8
AHU - PLA	108.0
AHU - IND	120.9
AHU - permanece	618.1

Nota. Se representan las principales clases de cobertura y uso del suelo: MAR (mar), LCO (línea costera), LAG (laguna), CMA (comunidad de manglar), PLA (plantaciones), AHU (asentamientos humanos) e industria (IND).

Fuente: Elaboración propia.

1. Disminución de pastizales: 755.5 ha han sido transformadas en aplicaciones industriales, asociadas al crecimiento del petróleo.
2. Disminución de manglares: Impactado en servicios ecosistémicos tales como salvaguarda de las costas y captura de carbono (Choudhary *et al.*, 2024; IPCC, 2022).
3. Expansión urbana: 172.2 ha de cultivos convertidos en AHU, vinculado a la migración local, en búsqueda de oportunidades de trabajo (Manley *et al.*, 2022).

Los resultados cuantitativos obtenidos mediante análisis multitemporal confirman patrones claros de transformación del territorio y evidencian que las mayores tasas de cambio anual correspondieron a las zonas industriales (IND), con +11.01%, seguido de los asentamientos humanos (AHU), con +6.08%. Estos aumentos evidencian el rápido proceso de industrialización y urbanización en la zona de análisis. Por otro lado, los ecosistemas naturales mostraron significativas disminuciones: -0.49% en los manglares (CMA) y -0.63% en las lagunas costeras (LCO), lo que representa una pérdida total de 142 ha de manglar en el periodo analizado. Las plantaciones (PLA) registraron una reducción anual del -0.98%, mientras que los pastizales (PAS) aumentaron +1.80%, evidenciando una transición hacia usos agropecuarios.

El área marina (MAR) registró la variación más baja (+0.21%), demostrando una estabilidad relativa en su área de cobertura. Esta información indica que las transformaciones más relevantes ocurrieron en las áreas vinculadas a las actividades humanas, en particular en el ámbito industrial y urbano (Figura 3). El estudio de las variaciones temporales se complementó con la creación de un mapa simulado que ilustra las modificaciones espaciales sucedidas entre 1994 y 2023 (Figura 4).

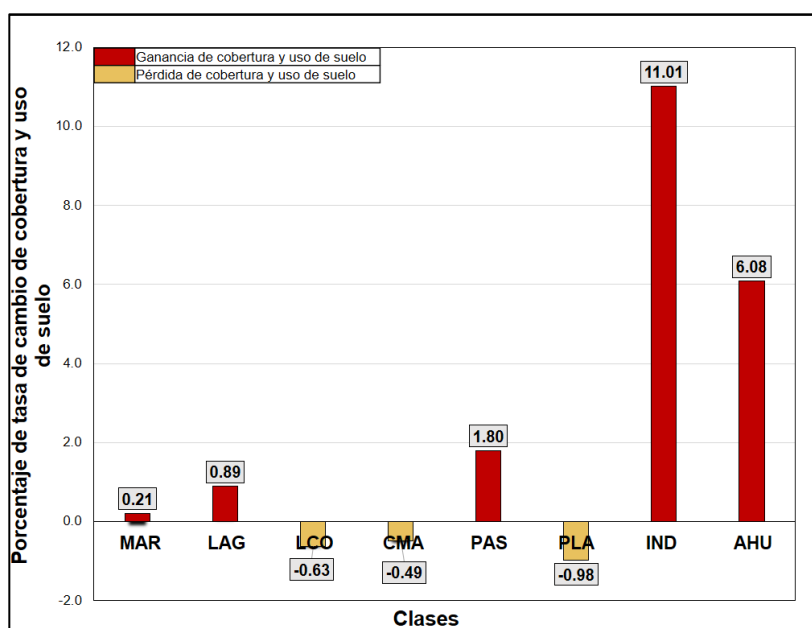


Figura 3. Gráfico de porcentaje de tasa de cambio de cobertura y uso de suelo de 1994 a 2023 en Las Flores 3ra Sección, Paraíso, Tabasco. Se representan las principales clases de cobertura y uso del suelo: MAR (mar), LCO (línea costera), LAG (laguna), CMA (comunidad de manglar), PLA (plantaciones), AHU (asentamientos humanos) e industria (IND).

Fuente: Elaboración propia.

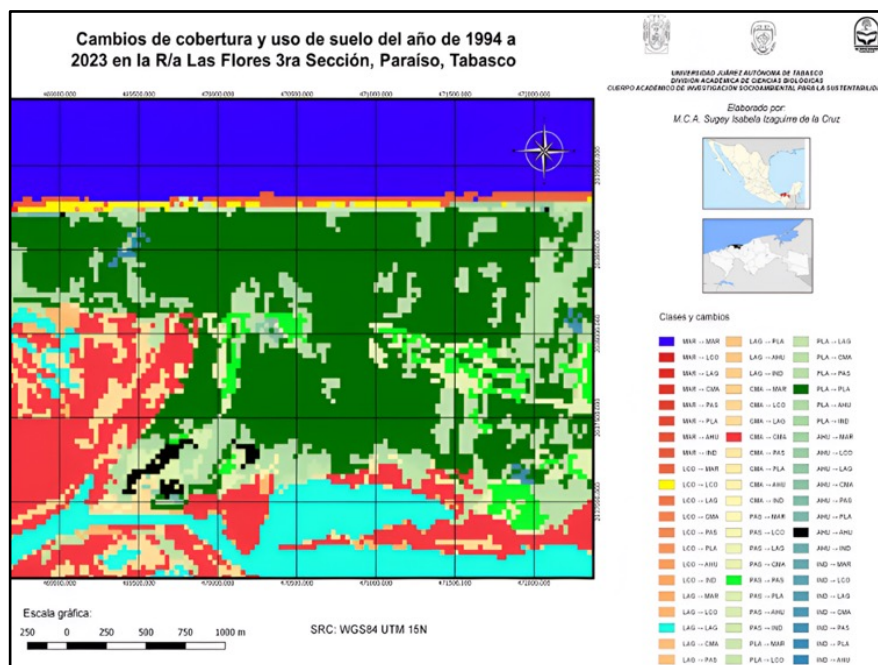


Figura 4. Mapa de cambio de cobertura y uso de suelo 1994-2023. Se representan los cambios en principales clases de cobertura y uso del suelo: MAR (mar), LCO (línea costera), LAG (laguna), CMA (comunidad de manglar), PLA (plantaciones), AHU (asentamientos humanos) e industria (IND).

Fuente: Elaboración propia.

Implicaciones socioambientales

Los cambios en la cobertura y uso del suelo entre 1994 y 2023 evidencian tensiones esenciales entre los patrones de crecimiento económico y los fundamentos de sostenibilidad ambiental. La disminución significativa de los manglares (48.7% del área inicial) y la ocupación de áreas inundables para usos urbanos han aumentado significativamente la vulnerabilidad climática de la región (Hernández *et al.*, 2017; Nájera *et al.*, 2021).

El progreso de la infraestructura petrolera resulta alarmante. A pesar de que ha generado puestos de trabajo para más de mil familias locales, ha originado problemas medioambientales que aún no han sido resueltos, como la polución de acuíferos y la devastación de ecosistemas relevantes (Moscoso-Baeza & De Escobar-Fernández, 2022).

El estudio multitemporal evidencia que las alteraciones en la cobertura y uso del suelo funcionan como un complejo sistema de causas y efectos del clima. Por una parte, la transformación de manglares — con una capacidad de secuestro calculada en $3.14 \pm 0.82 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Ray *et al.*, 2011) — en pastizales naturales ha suprimido importantes reservorios de carbono. La pérdida de vegetación natural disminuye la habilidad para recuperar los ecosistemas, mientras que la ampliación de zonas pavimentadas y urbanizadas aumenta la vulnerabilidad a inundaciones y otros eventos climáticos perjudiciales. Estas modificaciones, unidas a la creciente frecuencia e intensidad de fenómenos climáticos extremos, crean un ciclo perjudicial de degradación ambiental. En consecuencia, se produce una pérdida progresiva de servicios esenciales del ecosistema, tales como la regulación del agua y la salvaguarda de las costas, aumentando así la vulnerabilidad de las comunidades locales a estos riesgos.

Como indican Acosta-Velázquez *et al.* (2023), este ciclo degradante es especialmente relevante en el trópico húmedo, donde los ecosistemas costeros proporcionan una defensa natural contra las inundaciones. Los modelos estiman que si persisten las tasas de transformación actuales (1.2% anual), para 2030 se habrá perdido el 60% de la capacidad adaptativa residual (Bunting *et al.*, 2018).

Discusión

Los hallazgos indican un rápido cambio en el área de estudio, con un incremento en las actividades industriales y urbanas que impacta a significativos ecosistemas costeros. Este modelo se alinea con lo registrado por García-Cuéllar *et al.* (2004) en otras regiones del Golfo de México, donde el crecimiento industrial del petróleo ha propiciado transformaciones drásticas en la utilización del terreno. El ritmo anual de expansión industrial (+11.01%) evidencia la fuerza de las presiones humanas y se asemeja a lo detectado por Gallardo *et al.* (2022) en Bahía de Banderas, Nayarit. En ese lugar, el desarrollo urbano y turístico reemplazó coberturas naturales de vegetación, provocando desequilibrios socio ecológicos y la pérdida de servicios de los ecosistemas.

La disminución de manglares (-0.49% anual) es particularmente alarmante, dado que estos ecosistemas ofrecen servicios fundamentales para la adaptación climática, tales como la salvaguarda de las costas y la captura de carbono (Goldberg *et al.*, 2020). Nuestros hallazgos corroboran que su disminución ha aumentado la susceptibilidad local a las inundaciones, un fenómeno que también observaron Acosta-Velázquez *et al.* (2023) en los humedales del trópico húmedo. Además, la transformación de 755.5 ha de pastizales en áreas industriales muestra un traslado de las actividades agropecuarias tradicionales, lo que podría poner en riesgo la seguridad alimentaria de las comunidades locales (Ray *et al.*, 2011). Este fenómeno concuerda con lo reportado en Bahía de Banderas, donde el crecimiento urbano trasladó terrenos agrícolas a áreas periféricas, incrementando la presión sobre los ecosistemas de ribera (Gallardo *et al.*, 2022).

La expansión urbana (+6.08% anual) se rige por patrones de ocupación en zonas inundables, lo cual coincide con lo reportado por Arreguín-Cortés *et al.* (2014) en otros poblados costeros de Tabasco. Esta ampliación, provocada por la migración laboral, genera un ciclo problemático: al asentarse en zonas de alto riesgo, se incrementa la exposición a riesgos climáticos, lo que a su vez demanda una mayor infraestructura de resguardo (Álvarez & Tuñón, 2016). Como indica la investigación de Bahía de Banderas, la ausencia de planificación territorial intensifica estos efectos, resaltando la importancia de incorporar aspectos ecológicos en los planes de desarrollo (Gallardo *et al.*, 2022).

Conclusiones

Este estudio evidencia que las modificaciones en la cobertura y uso de suelo entre 1994 y 2023 han transformado radicalmente la resistencia en el área de estudio. Así, tres descubrimientos fundamentales surgen: (1) El impulsor principal de la transformación territorial ha sido la industrialización. Las tasas de cambio superan las medias a nivel regional e impactan particularmente en manglares y pastizales. (2) La urbanización irregular en áreas inundables ha incrementado la vulnerabilidad a los peligros climáticos, disminuyendo la habilidad de adaptación de las comunidades. (3) La desaparición de ecosistemas costeros (142 ha de manglares) ha puesto en riesgo servicios ecosistémicos vitales, tales como la regulación del agua y la captura de carbono.

Estos hallazgos demandan medidas de política pública inmediatas, incluyendo:

- Diseñar sistemas de ordenamiento territorial que integren consideraciones climáticas, mediante un modelo de gestión social que involucre a los sectores público, privado y social en la elaboración de estrategias frente al cambio climático. Esto resalta la importancia de un enfoque interdisciplinario en la planificación del territorio (Flores *et al.*, 2024).
- Controlar la expansión industrial a través de evaluaciones estratégicas de impacto ambiental, con el objetivo de prevenir o minimizar sus impactos perjudiciales en el medio ambiente (Lawal & Afolalu, 2024).
- Tal como indica el IPCC (2022), los contextos de cambio costero como el documentado aquí necesitan enfoques integrados que conecten conservación, desarrollo y adaptación al clima.

El constante vínculo entre la urbanización no regulada y el incremento de riesgos (Izaguirre, 2022) enfatiza la necesidad de modernizar los instrumentos de planificación territorial con criterios climáticos, en particular en áreas costeras. Esta investigación, sumada a los datos de Gallardo *et al.* (2022), proporciona información cuantitativa que facilita la orientación de estas acciones en zonas tropicales con alta presión humana, donde la cooperación entre la ciencia y la política es fundamental para fomentar la resistencia.

Agradecimientos

La autora agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SCHTI) por el apoyo brindado a través de la beca número 823093, otorgada en el marco del Programa Nacional de Posgrados del Doctorado en Ecología y Manejo de Sistemas Tropicales. Este respaldo ha sido fundamental para el desarrollo del presente trabajo de investigación. Asimismo, se expresa un especial reconocimiento a la comunidad de la ranhería Las Flores 3^{ra} Sección, Paraíso, Tabasco, por su colaboración, disposición y participación durante el proceso de recopilación de información en campo. Su conocimiento local y compromiso fueron esenciales para contextualizar los hallazgos y fortalecer el enfoque territorial de esta investigación.

Conflicto de interés

Los autores manifiestan no conflictos de interés.

Referencias

- Acosta-Velázquez, J., Ochoa-Gómez, J., Vázquez-Lule, A., & Guevara, M. (2023). Changes in mangrove coverage classification criteria could impact the conservation of mangroves in Mexico. *Land Use Policy*, 129, 106651. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2023.106651>
- Aguilar, C. E. (2024). Apuntes para una historia ambiental de la industria petrolera en México: algunas reflexiones y consideraciones. *ULUA Revista de Historia, Sociedad y Cultura*, 22(43), 93-123. <https://doi.org/10.25009/urhsc.v22i43.2816>
- Álvarez, G. C., & Tuñón, E. (2016). Vulnerabilidad social de la población desplazada ambiental por las inundaciones de 2007 en Tabasco (México). *Cuadernos de Geografía Revista Colombiana de Geografía*, 25(1), 123-138. <https://doi.org/10.15446/rcdgv25n1.52591>
- Álvarez-Soberano, A., & Medrano-Pérez, O. R. (2020). Caracterización geomorfológica de la subcuenca Río Mezcalapa, Región Hidrológica Grijalva-Usumacinta (RH-30) en sureste de México. *Investigación y Ciencia*, 28(80), 32-44. <https://www.redalyc.org/journal/674/67464474004/html/>
- Antúnez, P. (2024). Mangrove area trends in Mexico due to anthropogenic activities: a synthesis of five decades (1970–2020). *Coasts*, 4(4), 726–739. <https://doi.org/10.3390/coasts4040038>
- Arreguín-Cortés, F. I., Rubio-Gutiérrez, H., Domínguez-Mora, R., & de Luna-Cruz, F. (2014). Análisis de las inundaciones en la planicie tabasqueña en el periodo 1995-2010. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 3, 5-32. <https://www.revistatya.org.mx/index.php/tyca/article/view/424>
- Bunting, P., Rosenqvist, A., Lucas, R. M., Rebelo, L. M., Hilarides, L., Thomas, N., Hardy, A., Itoh, T., Shimada, M., & Finlayson, C. M. (2018). The Global Mangrove Watch—A new 2010 global baseline of mangrove extent. *Remote Sensing*, 10(10), 1669. <https://doi.org/10.3390/rs10101669>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2018). *Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe: metodologías y herramientas para la evaluación de impactos de la inundación y la erosión por efecto del cambio climático*. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/44096-efectos-cambio-climatico-la-costa-america-latina-caribe-metodologias>
- Cortés-Gómez, C., Cervantes-Martínez, A., & Arce-Ibarra, A. M. (2023). Valoración sociocultural de los servicios ecosistémicos de la zona costera del Caribe mexicano. *Economía Sociedad y Territorio*, 23(73), 961–990. <https://doi.org/10.22136/est20231956>
- Chan, J. G., & Alejandro, C. M. (2024). Cambios sociales y ambientales en Paraíso, Tabasco, por la Refinería Olmeca en Dos Bocas. En E. A. García, D. Matías & D. E. Ramos (ed.), *Vivir y trabajar en ciudades con hidrocarburos* (pp. 103–126). Editorial Fontamara.
- Chen, L., Ma, Y., Lian, Y., Zhang, H., Yu, Y., & Lin, Y. (2023). Radiometric normalization using a pseudo-invariant polygon features-based algorithm with contemporaneous sentinel-2A and Landsat-8 OLI imagery. *Applied Sciences*, 13(4), 2525. <https://doi.org/10.3390/app13042525>
- Choudhary, B., Dhar, V., & Pawase, A. S. (2024). Blue carbon and the role of mangroves in carbon sequestration: its mechanisms, estimation, human impacts and conservation strategies for economic incentives. *Journal of Sea Research*, 199, 102504. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2024.102504>
- Del Angel-Meraz, E., Veleza, L., & Acosta-Alejandro, M. (2009). Agresividad atmosférica basada en el tiempo de humectación del clima tropical húmedo del estado de Tabasco. *Universidad y Ciencia*, 25(2), 111–120. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0186-29792009000200001&script=sci_arttext
- Dong, S., Chen, Z., Gao, B., Guo, H., Sun, D., & Pan, Y. (2020). Stratified even sampling method for accuracy assessment of land use/land cover classification: a case study of Beijing, China. *International Journal of Remote Sensing*, 41(16), 6427–6443. <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1739349>
- Fang, G., Xu, H., Yang, S., Lou, X., & Fang, L. (2023). Synergistic use of Sentinel-1, Sentinel-2, and Landsat 8 in predicting forest variables. *Ecological Indicators*, 151, 110296. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110296>
- Feng, Q., Liu, J., & Gong, J. (2015). Urban flood mapping based on unmanned aerial vehicle remote sensing and random forest classifier—a case of Yuyao, China. *Water*, 7(4), 1437–1455. <https://doi.org/10.3390/w7041437>

- Flores, S., López, R. J., & Cerón, M. G. (2024). Factores estructurales y acciones para mitigar los efectos del cambio climático en la Megalópolis de la Región Centro de México. *Posición. Revista del Instituto de Investigaciones Geográficas*, (12), 1–21. <https://posicion-inigeo.unlu.edu.ar/posicion/article/view/267>
- Gallardo, B. G., Morales, J. C., Frausto, O., Bravo, M. L., & Carrillo, F. M. (2022). Cambio de cobertura vegetal y uso de suelo generado por actividades agrícolas en el municipio de Bahía de Banderas, Nayarit, México. *Acta Universitaria*, 32, e5618. <http://doi.org/10.15174/au.2022.3618>
- García-Cuéllar, J. A., Arreguín-Sánchez, F., Hernández-Vázquez, S., & Lluch-Cota, D. B. (2004). Impacto ecológico de la industria petrolera en la sonda de Campeche, México tras tres décadas de actividad: una revisión. *Interciencia*, 29(6), 311–319. https://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S0378-18442004000600006&script=sci_arttext
- Goldberg, L., Lagomasino, D., Thomas, N., & Fatoyinbo, T. (2020). Global declines in human-driven mangrove loss. *Global Change Biology*, 26(10), 5844–5855. <https://doi.org/10.1111/gcb.15275>
- 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>
- Herrera-García, G., Ezquerro, P., Tomás, R., Béjar-Pizarro, M., López-Vinielles, J., Rossi, M., Mateos, R. M., Carreón-Freyre, D., Lambert, J., Teatini, P., Cabral-Cano, E., Erkens, G., Galloway, D., Hung, W., Kakar, N., Sneed, M., Tosi, L., Wang, H., & Ye, S. (2020). Mapping the global threat of land subsidence. *Science*, 371(6524), 34–36. <https://doi.org/10.1126/science.abb8549>
- Hernández, G. I., Sol, A., Ruíz, O., & Valdez, J. I. (2017). Controversias legislativas en la protección del ecosistema manglar: el caso Tabasco, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (14), 2841–2855. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i14.455>
- Ibarrarán, M. E., Malone, E. L., & Brenkert, A. L. (2009). Climate change vulnerability and resilience: current status and trends for Mexico. *Environment Development and Sustainability*, 12(3), 365–388. <https://doi.org/10.1007/s10668-009-9201-8>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2017). *Anuario estadístico del estado de Tabasco. Gobierno del Estado de Tabasco*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nuev_aestruc/anuarios_2017/702825095123.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2022). *Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación, escala 1:250 000, serie VI (cobertura 2019)*. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463673353>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge University press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>
- Izaguirre, S. I. (2022). *Vulnerabilidad y riesgo socioambiental ante el cambio climático de la R/a Las Flores, Paraíso, Tabasco* [Tesis de maestría]. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. <https://ri.ujat.mx/handle/200.500.12107/4724>
- Kennedy, R. E., Yang, Z., Gorelick, N., Braaten, J., Cavalcante, L., Cohen, W. B., & Healey, S. (2018). Implementation of the LandTrendr algorithm on Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 10(5), 691. <https://doi.org/10.3390/rs10050691>
- Kovalskyy, V., & Roy, D. P. (2013). The global availability of Landsat 5 TM and Landsat 7 ETM+ land surface observations and implications for global 30m Landsat data product generation. *Remote Sensing of Environment*, 130, 280–293. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.12.003>
- Lawal, S. L., & Afolalu, S. A. (2024). Environmental impact assessment in asset integrity management: sustainable practices in oil and gas facilities. *Proceedings of the 2024 International Conference on Science, Engineering and Business for Driving Sustainable Development Goals (SEB4SDG)*, Omu-Aran, Nigeria, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/SEB4SDG60871.2024.10630251>
- Manley, E., Ogneva-Himmelberger, Y., Ruelle, M., Hanumantha, R., Mazari-Hiriart, M., & Downs, T. J. (2022). Land-cover change and urban growth in the Mexico-Lerma-Cutzamala hydrological region, 1993–2018. *Applied Geography*, 147, 102785. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2022.102785>

- Moscoso-Baeza, D., & De Escobar-Fernández, A. M. (2022). Impacto económico de la Refinería Olmeca en el municipio de Paraíso, Tabasco. *Revista de Investigaciones Universidad del Quindío*, 34(5), 98-108. <https://doi.org/10.33975/riuq.vol34ns5.1086>
- Muhammad, R., Zhang, W., Abbas, Z., Guo, F., & Gwiazdzinski, L. (2022). Spatiotemporal change analysis and prediction of future land use and land cover changes using QGIS MOLUSCE plugin and remote sensing big data: a case study of Linyi, China. *Land*, 11(3), 419. <https://doi.org/10.3390/land11030419>
- Nájera, A., Carrillo, F. M., Morales, J. C., & Nájera, O. (2021). Cambio de cobertura y uso de suelo en llanura costera asociados a procesos antropogénicos: caso San Blas, Nayarit. *Madera y Bosques*, 27(1), e2712104. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2712104>
- Neumann, B., Vafeidis, A. T., Zimmermann, J., & Nicholls, R. J. (2015). Future coastal population growth and exposure to sea-level rise and coastal flooding- a global assessment. *PLoS ONE*, 10(3), e0118571. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118571>
- Olofsson, P., Foody, G. M., Herold, M., Stehman, S. V., Woodcock, C. E., & Wulder, M. A. (2014). Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment*, 148, 42-57. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015>
- Palma-López, D. J., Jiménez, R., Zavala-Cruz, J., Bautista-Zúñiga, F., Gavi, F., & Palma-Cancino, D. Y. (2017). Actualización de la clasificación de suelos de Tabasco, México. *Agroproductividad*, 10(12), 29-35. <https://mail.revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/33>
- Puyravaud, J. (2003). Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management*, 177(1-3), 593-596. [https://doi.org/10.1016/s0378-1127\(02\)00335-3](https://doi.org/10.1016/s0378-1127(02)00335-3)
- Ramos, R., & Palomeque, M. Á. (2023). Cambio de uso del suelo y escenarios prospectivos en el Estado de Tabasco (México). *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 43(1), 185-209. <https://doi.org/10.5209/aguc.85944>
- Ray, R., Ganguly, D., Chowdhury, C., Dey, M., Das, S., Dutta, M. K., Mandal, S. K., Majumder, N., De, T. K., Mukhopadhyay, S., & Jana, T. K. (2011). Carbon sequestration and annual increase of carbon stock in a mangrove forest. *Atmospheric Environment*, 45(28), 5016-5024. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.04.074>
- Richards, J. A. (2022). *Remote sensing digital image analysis*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-82327-6>
- Rodríguez-Veiga, P., Saatchi, S., Tansey, K., & Balzter, H. (2016). Magnitude, spatial distribution and uncertainty of forest biomass stocks in Mexico. *Remote Sensing of Environment*, 183, 265-281. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.06.004>
- Roy, D. P., Wulder, M. A., Loveland, T. R., Woodcock, C. E., Allen, R. G., Anderson, M. C., Helder, D., Irons, J. R., Johnson, D. M., Kennedy, R., Scambos, T. A., Schaaf, C. B., Schott, J. R., Sheng, Y., Vermote, E. F., Belward, A. S., Bindaschadler, R., Cohen, W. B., Gao, F., ... Zhu, Z. (2014). Landsat-8: science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*, 145, 154-172. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.001>
- Sánchez, E. P., & Trejo, H. H. (2024). Evaluación espacio-temporal de los manglares de la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla, Tabasco. *Kukulkab*, 30(68), e6390. <https://doi.org/10.19136/kukulkab.a30n68.6390>
- Shaw, J., Anderson, C., Choate, M., & Micijevic, E. (2024). Landsat geometric and radiometric calibration and characterization. *Fact Sheet*, 2024-3039. <https://doi.org/10.3133/fs20243039>
- Stehman, S. V., & Foody, G. M. (2019). Key issues in rigorous accuracy assessment of land cover products. *Remote Sensing of Environment*, 231, 111199. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.05.018>
- Wang, C., Hunt, E. R., Zhang, L., & Guo, H. (2013). Phenology-assisted classification of C3 and C4 grasses in the U.S. Great Plains and their climate dependency with MODIS time series. *Remote Sensing of Environment*, 138, 90-101. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.07.025>
- Zhang, X., Treitz, P. M., Chen, D., Quan, C., Shi, L., & Li, X. (2017). Mapping mangrove forests using multi-tidal remotely-sensed data and a decision-tree-based procedure. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 62, 201-214. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.06.010>
- Zhu, Z., Zhang, J., Yang, Z., Aljaddani, A. H., Cohen, W. B., Qiu, S., & Zhou, C. (2019). Continuous monitoring of land disturbance based on Landsat time series. *Remote Sensing of Environment*, 238, 111116. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.009>