



**UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO**  
División Académica de Ciencias Biológicas  
“Estudio en la duda. Acción en la fe”



---

---

**“ESTUDIO DE CAMBIO DE COBERTURA Y USO DE SUELO (2000-2020) EN ESCÁRCEGA, CAMPECHE, MÉXICO”**

**Trabajo recepcional, en la modalidad de:**

Tesis

**Para obtener el título en:**

Licenciatura en Ingeniería Ambiental

**Presenta:**

Lisa Limón Salas

**Directores:**

Dra. Claudia Villanueva García  
M. en C. Elías José Gordillo Chávez



UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS  
DIRECCIÓN

Villahermosa, Tab., a 03 de Febrero de 2023

ASUNTO: Autorización de Modalidad de Titulación

**C. LIC. MARIBEL VALENCIA THOMPSON  
JEFE DEL DEPTO. DE CERTIFICACIÓN Y TITULACION  
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES  
P R E S E N T E**

Por este conducto y de acuerdo a la solicitud correspondiente por parte del interesado, informo a usted, que en base al reglamento de titulación vigente en esta Universidad, ésta Dirección a mi cargo, autoriza a la **C. LISA LIMÓN SALAS** egresado de la Lic. en **ING. AMBIENTAL** de la División Académica de **CIENCIAS BIOLÓGICAS** la opción de titularse bajo la modalidad de Tesis denominado: **"ESTUDIO DE CAMBIO DE COBERTURA Y USO DE SUELO (2000-2020) EN ESCÁRCEGA, CAMPECHE, MÉXICO"**.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para saludarle afectuosamente.

A T E N T A M E N T E

  
DR. ARTURO GARRIDO MORA  
DIRECTOR DE LA DIVISIÓN ACADÉMICA  
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

C.c.p.- Expediente Alumno de la División Académica  
C.c.p.- Interesado

D.J.A.T.  
DIVISIÓN ACADÉMICA  
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



DIRECCIÓN



**UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS  
DIRECCIÓN**

FEBRERO 03 DE 2023

**C. LISA LIMÓN SALAS  
PAS. DE LA LIC. EN ING. AMBIENTAL  
PRESENTE**

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 80 al 85 del Cap. III del Reglamento de titulación de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se le autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Tesis denominado: **"ESTUDIO DE CAMBIO DE COBERTURA Y USO DE SUELO (2000-2020) EN ESCÁRCEGA, CAMPECHE, MÉXICO"**, asesorado por la Dra. Claudia Villanueva García y M. en C. Elías José Gordillo Chávez sobre el cual sustentará su Examen Profesional, cuyo jurado está integrado por el Dr. Cristóbal Daniel Rullan Silva, Dra. Ena Edith Mata Zaya, Dra. Claudia Villanueva García, Dr. Luis José Rangel Ruiz y Dra. Coral Jazvel Pacheco Figueroa.

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

  
**DR. ARTURO GARRIDO MORA  
DIRECTOR**

**U.J.A.T.  
DIVISIÓN ACADÉMICA  
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**



**DIRECCIÓN**

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

## CARTA AUTORIZACIÓN

El que suscribe, autoriza por medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice tanto física como digitalmente el Trabajo Recepcional en la modalidad de Tesis de Licenciatura denominado: **“ESTUDIO DE CAMBIO DE COBERTURA Y USO DE SUELO (2000-2020) EN ESCÁRCEGA, CAMPECHE, MÉXICO”**, de la cual soy autor y titular de los Derechos de Autor.

La finalidad del uso por parte de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco el Trabajo Recepcional antes mencionada, será única y exclusivamente para difusión, educación y sin fines de lucro; autorización que se hace de manera enunciativa más no limitativa para subirla a la Red Abierta de Bibliotecas Digitales (RABID) y a cualquier otra red académica con las que la Universidad tenga relación institucional.

Por lo antes manifestado, libero a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de cualquier reclamación legal que pudiera ejercer respecto al uso y manipulación de la tesis mencionada y para los fines estipulados en éste documento.

Se firma la presente autorización en la ciudad de Villahermosa, Tabasco el Día 03 de Febrero de Dos Mil Veintitrés.

**AUTORIZO**

Lisa Limón Salas 

---

**LISA LIMÓN SALAS**

# ESTUDIO DE CAMBIO DE COBERTURA Y USO DE SUELO (2000-2020) EN ESCÁRCEGA, CAMPECHE, MÉXICO.

---

INFORME DE ORIGINALIDAD

---

0%

ÍNDICE DE SIMILITUD

---

FUENTES PRIMARIAS

---

EXCLUIR CITAS

ACTIVADO

EXCLUIR FUENTES

< 10%

EXCLUIR BIBLIOGRAFÍA

ACTIVADO

EXCLUIR COINCIDENCIAS

< 15 PALABRAS

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todas las personas que con su apoyo científico y humano han permitido la realización de esta tesis. Esta no podría haberse escrito sin ustedes.

En primer lugar, agradezco el financiamiento de BioPaSOS (Biodiversidad y Paisajes Ganaderos Agrosilvopastoriles Sostenibles) implementado por el CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza), con el apoyo del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), en coordinación con la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) y la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (AGRICULTURA) y el financiamiento de la Iniciativa Internacional del Clima (IKI).

Muy especialmente a mis asesores y directores de tesis, la Dra. Claudia y el Mtro. Elías, gracias no solo por compartir sus conocimientos conmigo y guiarme en este camino, sino también por cuidar de mí, tenerme paciencia, demostrarme su apoyo y siempre buscar que mejorara. A ustedes, muchas gracias, no pude haber tenido mejores asesores. Sepan que a dónde quiera que vaya los recordaré con gran cariño.

A mis sinodales y al Laboratorio de Ecología del Paisaje, por su orientación y comentarios que permitieron mejorar mi tesis. Gracias por dedicarme su valioso tiempo.

De igual forma, especial mención merece el Mtro. Ricardo, quién muy amablemente me asesoró en mi metodología, permitiéndome avanzar en el desarrollo de esta tesis, por lo que le agradezco infinitamente.

Así mismo, a las comunidades visitadas en el municipio de Escárcega y a la ANP Balam Kú, por su amable recibimiento y por permitirme recolectar la información necesaria para este proyecto.

## DEDICATORIA

Debo reconocer que esta tesis le debe mucho, consciente e inconscientemente, a mi familia y a su gran influencia para que la pudiera terminar. Para ustedes está dedicada esta tesis.

A ti mamá, por llevarme para todos lados, recordarme que soy capaz de lograr mis metas y no dejar que me rindiera. A ti papá, porque siempre me diste tu consejo y apoyaste en las decisiones que tomé. Muchas gracias a ambos por darme todo lo que estuvo en sus manos para que pudiera terminar mis estudios.

A mi hermano Papablo por ayudar mucho a mis papás, permitiendo que yo pudiera dedicar más de mi tiempo a escribir esta tesis.

A mamá Irene y papá Vale, porque siempre se han mostrado muy orgullosos de mí, y eso me ha dado ánimo de seguir adelante. Doy gracias a Dios por tenerlos todavía conmigo y que me puedan ver culminar esta etapa.

A mis tíos, Gaby, Ray y Jorge, porque han contribuido en mi desarrollo no solo personal, sino también académico y profesional, y siempre me han echado porras en todo.

A Andrés, por estar conmigo desde el momento que decidí hacer tesis como mi método de titulación, hasta que me dieron el visto bueno para imprimirla. Porque me escuchó y demostró su apoyo, animándome a continuar y a creer más en mí.

Así como a Indira, Adri y Brenda, porque saben lo mucho que me costó terminar esta tesis y estuvieron ahí para escuchar mis mejores y peores momentos desde antes que iniciara la carrera.

## TABLA DE CONTENIDO

1.	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
2.	<b>JUSTIFICACIÓN</b> .....	3
3.	<b>ANTECEDENTES</b> .....	4
4.	<b>OBJETIVOS</b> .....	6
5.	<b>ÁREA DE ESTUDIO</b> .....	7
6.	<b>MÉTODO</b> .....	8
A)	<b>Elaboración cartográfica</b> .....	8
A.1.1)	Preprocesamiento .....	10
A.1.1.1)	Control de calidad geométrica.....	10
A.1.1.2)	Corrección radiométrica.....	11
A.1.1.3)	Corrección atmosférica .....	12
A.1.1.4)	Mosaico.....	12
A.1.1.5)	Composición de bandas.....	13
A.2)	Procesamiento.....	13
A.2.2)	Construcción de firmas espectrales .....	14
A.2.2.1)	Creación de ROIs .....	15
A.2.2.2)	Extracción y evaluación de las firmas espectrales.....	16
A.2.3)	Clasificación de la imagen.....	17
A.2.4)	Post-clasificación .....	18
A.2.4.1)	Refinamiento de la clasificación.....	18
A.2.4.2)	Inclusión de clases faltantes .....	18
A.3)	Evaluación de la precisión de la clasificación .....	20
B)	<b>Cambios de uso del suelo y coberturas entre los años 2000 y 2020</b> .....	22
C)	<b>Tasas de cambio</b> .....	22
D)	<b>Patrones de cambio</b> .....	23
7.	<b>RESULTADOS</b> .....	24
A)	<b>Generación de la cartografía</b> .....	24
B)	<b>Cambios en la cobertura y usos de suelo</b> .....	28
C)	<b>Tasas de cambio</b> .....	33
D)	<b>Patrones de cambio</b> .....	33
8.	<b>DISCUSIÓN</b> .....	34
9.	<b>CONCLUSIÓN</b> .....	39
10.	<b>LITERATURA CITADA</b> .....	40

## 1. INTRODUCCIÓN

La cobertura vegetal se define como las cualidades biofísicas de la superficie terrestre, mientras que los usos del suelo son los distintos resultados de la actividad antrópica sobre la cubierta del suelo en donde se aprovechan dichas cualidades. En conjunto establecen el funcionamiento de los ecosistemas, impactando directamente en la biodiversidad y por ende, en los cambios climáticos desde la escala local a la global (Velázquez *et al.*, 2010). A su vez, los cambios de cobertura y uso de suelo son resultado de factores sociales, económicos y ambientales en un lugar y tiempo, que generan un impacto físico en el paisaje (Geist y Lambin, 2001). Existen procesos que determinan dichos cambios, como lo son: a) la deforestación, que es el cambio permanente de la cobertura arbórea; b) la degradación, que es la modificación pero no el reemplazo total de la vegetación natural y c) la fragmentación, donde la cobertura se divide en pequeños parches y es rodeada de superficies alteradas (SEMARNAT, 2016).

En México, uno de los países con mayor extensión de vegetación natural en el mundo (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2012), los cambios de cobertura y uso de suelo constituyen una de las principales amenazas a su biodiversidad. Es por esto que en el país se han realizado diversos estudios al respecto, con objetivos y metodologías variadas durante diferentes periodos (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2020). Estos estudios han demostrado que, de las coberturas vegetales en el país, las selvas han sufrido las mayores pérdidas y transformaciones a lo largo de los años, contrariamente a la superficie dedicada a las actividades agropecuarias, la cual ha aumentado continuamente (SEMARNAT, 2012).

Las áreas protegidas dentro del país, principalmente las categorizadas como reservas de la biosfera, han sido más efectivas en prevenir los cambios de uso de suelo (Figuroa y Sánchez-Cordero, 2008). En particular, el estado de Campeche tiene bajo protección el 40% de su superficie a través de Áreas Naturales Protegidas [ANPs], ya que posee parte de la Selva Maya, el sistema forestal más grande de México y el segundo más grande de América (Gobierno del Estado de Campeche y Pronatura, 2012). Sin embargo, la Selva Maya se ha visto fuertemente afectada por la deforestación, proceso que determina los cambios de uso de suelo, por lo que se considera como un área crítica en el país (CONAFOR, 2020).

Dentro de los municipios de Campeche que poseen parte de la Selva Maya, se encuentra el municipio de Escárcega, el cual conserva la vegetación más abundante en la entidad, conformada

principalmente por selva mediana y baja subperennifolia (Plan de Desarrollo Municipal [PDM] Escárcega, 2018), sin embargo, también es de los municipios con la mayor deforestación en el Estado (Monzón-Alvarado *et al.* 2016). En este sentido, un estudio reciente en el municipio de Escárcega del cambio de cobertura y uso de suelo es necesario para identificar los factores inmediatos que ocasionan la deforestación, como pueden ser la expansión de la agricultura y subyacentes, así como también el aumento demográfico (Geist y Lambin, 2001). Una investigación de este tipo en el municipio es importante considerando la relación de los cambios de cobertura y uso de suelo con la pérdida de la biodiversidad, la pérdida de la producción primaria, la alteración del ciclo hidrológico, la erosión del suelo y el incremento de la temperatura (Vargas-Villamizar y Rosales-Salas, 2014). A su vez, el identificar la influencia del uso agropecuario en la cobertura arbórea conducirá al planteamiento de alternativas que minimicen los daños ocasionados, como la implementación de sistemas silvoagropecuarios y la mejora de las políticas públicas, como el fortalecimiento del ordenamiento territorial (Organización de las Naciones Unidas de la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2006). Al mismo tiempo, conocer la pérdida de cobertura arbórea podrá representar información importante para el programa social Sembrando Vida [SV] (Secretaría de Bienestar, 2020), permitiendo la búsqueda y realización de alternativas que mitiguen los impactos consecuentes, así como identificar aspectos a corregir para garantizar la permanencia de las parcelas en el tiempo y como base para investigaciones futuras sobre los resultados del programa (Warman *et al.*, 2021). Teniendo en cuenta esto, este estudio tiene como objetivo proporcionar una caracterización de los cambios en la cobertura y en el uso de suelo para los últimos 20 años (2000-2020), en el municipio de Escárcega, Campeche, mediante el uso de herramientas de teledetección obteniendo sus tasas y patrones de cambio para cada cobertura.

## 2. JUSTIFICACIÓN

Los patrones de cambio de uso de suelo varían en todo México debido a que las actividades culturales y socioeconómicas difieren entre regiones. Por esta razón, el disponer de un registro de los cambios en la cobertura y el uso de suelo a nivel local es esencial, puesto que nos va a permitir conocer sus conductores políticos, culturales y socioeconómicos (Mendoza-Ponce *et al.*, 2019).

Al realizar un estudio del cambio en la cobertura y uso de suelo en el municipio de Escárcega, Campeche, se obtendrá información de los procesos de transformación que sufre la cobertura vegetal. Esto permitirá ubicar y cuantificar los tipos de coberturas vegetales que representan el mayor porcentaje de afectación, las actividades que han propiciado dichos cambios y los tipos de uso de suelo con los que han sido reemplazadas (Escandón-Calderón *et al.*, 2018). Además de esto, los resultados serán de utilidad e importancia, como un marco de referencia para el fortalecimiento de los ordenamientos territoriales, respecto al desarrollo urbano, agrícola, social y económico, permitiendo el establecimiento de nuevas políticas públicas y estrategias para la planificación territorial (Ojima *et al.*, 1994).

### 3. ANTECEDENTES

El interés de los estudios de cambio de cobertura y uso del suelo se fundamenta en la preocupación hacia el incremento de la deforestación, provocada por la transformación de bosques y selvas en áreas dedicadas al uso agropecuario y urbano (Cortina-Villar *et al.*, 1998) y fomentada por políticas públicas. México, por ejemplo, en los años setenta llegó a tener las tasas más altas de deforestación a nivel mundial, con una pérdida de selvas acelerada y una degradación de grandes superficies de cubierta primaria, mientras que paralelamente se expandían los terrenos agropecuarios (SEMARNAT, 2012).

La CONAFOR (2020) estima que, en México para el año 2018, 102 038 ha se convirtieron en pastizales, mientras que 64 299 ha en tierras agrícolas. En el país, los principales impulsores del cambio de uso de suelo de terrenos forestales a actividades agropecuarias son: la proximidad de caminos, asentamientos humanos y cuerpos de agua, además de las bajas altitudes y pendientes poco pronunciadas (Mendoza-Ponce *et al.*, 2019).

Dentro de México, la región sur históricamente ha sido la más impactada por los cambios de uso de suelo, contando con las tasas de deforestación más altas a nivel nacional (CONAFOR, 2020). Una zona de importancia ecológica en esta región por poseer la Selva Maya y que igualmente ha demostrado una pérdida en su cobertura vegetal, es la Península de Yucatán, conformada por los estados de Yucatán, Quintana Roo y Campeche. Esta pérdida ha sido ocasionada principalmente por la agricultura de subsistencia, aunque la ganadería y la agricultura extensiva también representan una amenaza creciente (Vester *et al.*, 2007).

Particularmente el estado de Campeche cuenta con coberturas predominantes de selvas medianas y altas, y en menor proporción de selvas bajas, manglares y otras cubiertas forestales, teniendo uno de los porcentajes más altos a nivel nacional de vegetación natural (77 % de su superficie) (SEMARNAT, 2012). Sin embargo, en dicho estado se registró entre los años 1976 y 2005, una tasa de deforestación de 0.74 %, relacionada a cambios de uso de suelo para la ganadería y agricultura (Martínez-Romero y Esparza-Olguín, 2010). Cabe mencionar que dentro de esta entidad se ha destinado el 5.2 % de su superficie a la agricultura, siendo los principales cultivos el maíz, sorgo, caña de azúcar y palma de aceite, un 26.6 % a la ganadería y un 68 % al uso forestal (Secretaría de Desarrollo Rural [SDR], 2016).

Los cambios de uso de suelo más importantes en Campeche se han concentrado en zonas bajas, donde el manto freático se encuentra a baja profundidad y los suelos son de mayor utilidad para la agricultura y la ganadería (Cortina-Villar *et al.*, 1998). Esto ha ocasionado que a nivel estatal el aumento en los paisajes antrópicos siga una tendencia proporcional al crecimiento poblacional, y ha propiciado a que la mayoría de su superficie todavía posea hábitats con funcionalidad íntegra e intermedia (Benítez *et al.*, 2021).

Los municipios de Campeche que se destacan por la mayor superficie de cobertura forestal son Calakmul y Escárcega, aunque igualmente forman parte de las municipalidades responsables de la mayor pérdida de cobertura arbórea en el estado, entre los años 2001 y 2020 (Global Forest Watch, 2021). A pesar de esto, la mayoría de la información disponible dentro de la entidad proviene de estudios de la Reserva de la Biósfera de Calakmul [RBC], la cual tiene una tendencia a la reducción en su deforestación, con tasas menores a las de otras zonas dentro del estado (Ellis *et al.*, 2017).

Especialmente el municipio de Escárcega tiene una cantidad reducida de estudios recientes relacionados al cambio de cobertura y uso de suelo. De acuerdo con el Programa de Ordenamiento Ecológico del Territorio [POET] del Municipio de Escárcega (2015), el cual se basa en un estudio de cambio de cobertura y uso de suelo para el periodo 1976-2003; la tasa de deforestación era de -0.86 %, con una pérdida del 15.34 % de las selvas por deforestación y una sustitución de vegetación secundaria por actividades agropecuarias del 2.07 %.

Es importante mencionar que dicho municipio presenta índices significativos de marginación y pobreza (SDR, 2016) y que estas podrían ser razones que aumenten la presión sobre las áreas forestales, conduciendo a que los cambios de uso de suelo se incrementen (Corona *et al.*, 2016). En relación con esto, el PDM de Escárcega (2018) tiene dentro de sus objetivos el impulso al campo para una mayor productividad y competitividad, esto mediante el impulso de programas como SV, el cual se ha implementado en el municipio desde el 2019. Hasta el momento, de acuerdo con el PDM de Escárcega 2018-2021, los usos de suelo en el municipio se encuentran divididos en: Agricultura (16.27 %), Zona urbana (0.29 %) y Pastizal inducido (0.03 %); y las coberturas vegetales en: Selva (81.41 %), Tular (0.27 %) y Otros (0.77 %).

## 4. OBJETIVOS

### 4.1. General:

- Caracterizar el cambio de cobertura y uso de suelo del municipio de Escárcega, Campeche, México, entre los años 2000 y 2020.

### 4.2. Específicos:

- Generar la cartografía de vegetación y usos del suelo del municipio de Escárcega para los años 2000 y 2020.
- Identificar los cambios en la cobertura arbórea y usos de suelo del municipio de Escárcega en un periodo de tiempo de 20 años.
- Calcular las tasas de cambio entre los años 2000 y 2020 en el municipio de Escárcega en un periodo de tiempo de 20 años.
- Determinar los patrones de cambio de cobertura entre los años 2000 y 2020 en el municipio de Escárcega en un periodo de tiempo de 20 años.

## 5. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio abarca el municipio de Escárcega, dentro del Estado de Campeche, México, entre las coordenadas 18°11'35.774" y 18°59'55.715" de latitud norte y 91°1'56.741" y 90°3'38.778" de longitud oeste, contando con una superficie de 4,708.33 km<sup>2</sup> (POET del municipio de Escárcega, 2015). Dicho municipio posee parte de las ANP's, Balam Kú al sureste y Balam Kin al noreste, además de colindar al este con la Reserva de la Biósfera de Calakmul.

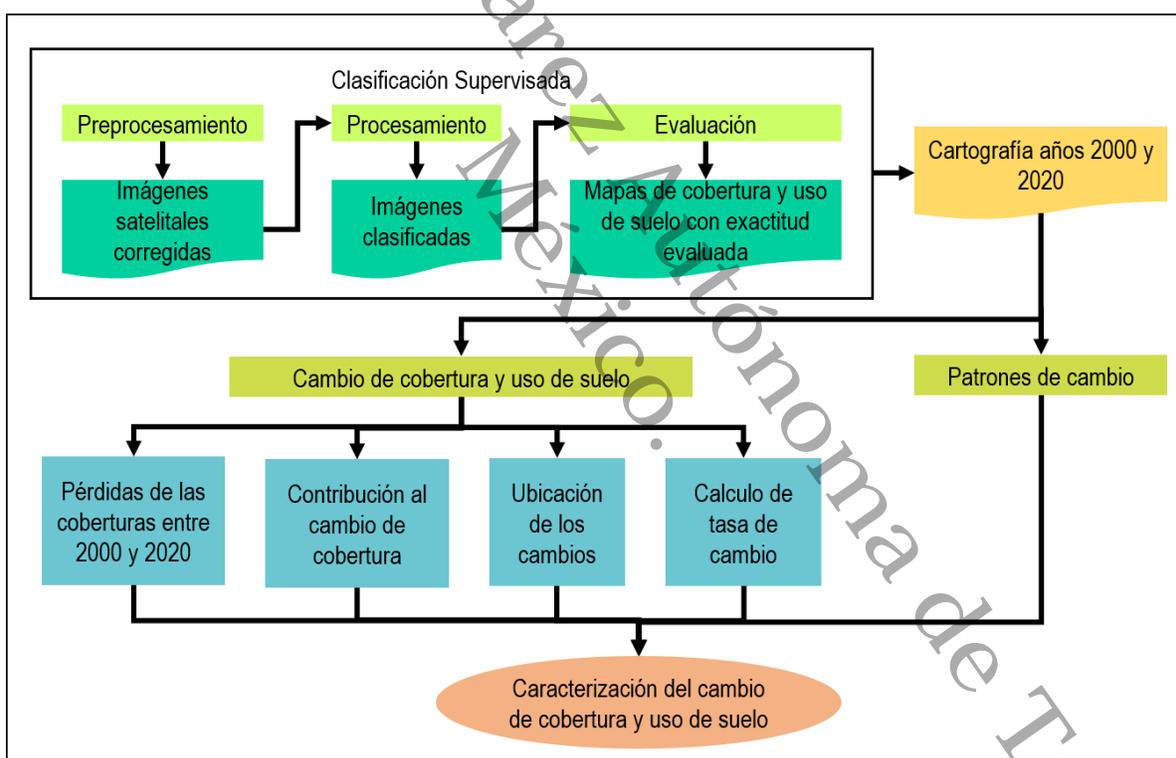
El clima es cálido subhúmedo, posee lluvias principalmente en verano, con rango de precipitación de 1,100 a 1,600 mm y una temperatura promedio anual que varía entre los 23.3 °C y 26 °C (PDM Escárcega, 2018).

La vegetación predominante en la zona es la selva mediana subperennifolia, con árboles de altura media de 15 a 20 m, de los que destacan el chicozapote (*Manilkara zapota*), el chechén negro (*Metopium brownei*), el guano (*Sabal mexicana*) y el palo mulato (*Bursera simaruba*), sin embargo, dentro del estado en ese tipo de selvas se han identificado 415 especies vegetales (SEMARNAT y CONAFOR, 2014). Otros tipos de coberturas presentes son los pastizales cultivados, el popal-tular, el acahual, la agricultura de temporal, los cuerpos de agua y los asentamientos humanos (POET del municipio de Escárcega, 2015).

En cuanto al componente faunístico se encuentran diversas especies amenazadas y en peligro de extinción, como lo son el jaguar (*Panthera onca*), el jaguarundi (*Herpailurus yagouaroundi*), el ocelote (*Leopardus pardalis*), el margay (*Leopardus wiedii*), el puma (*Puma concolor*), el tapir (*Tapirus bairdii*), el pecarí de labios blancos (*Tayassu pecarí*), el mono aullador (*Alouatta spp*), el mono araña (*Ateles geoffroyi*), el águila elegante (*Spizaetus ornatus*), el guajolote ocelado (*Meleagris ocellata*), entre otros (Gobierno del Estado de Campeche y Pronatura, 2012).

## 6. MÉTODO

Para evaluar el cambio de la cobertura y del uso de suelo en el municipio de Escárcega entre los años 2000 y 2020, se generó la cartografía de ambos años a partir de una clasificación supervisada. En este tipo de clasificación se identifican regiones en la imagen (regiones de interés [ROI]) que representan a cada clase de cobertura, para después obtener su información espectral, realizar la clasificación y evaluar la precisión de la clasificación con información de campo (Warner *et al.*, 2021). A partir de la cartografía elaborada se identificaron los cambios de uso del suelo y se estimaron las tasas y patrones de cambio. En la Figura 1 se muestra un diagrama general de lo comprendido en la metodología. Esta metodología se realizó con el apoyo de los programas ENVI® 5.3 (Exelis Inc., 2015), QGIS® 3.22 (Sherman G, 2020), ArcGIS® 10.5 (Esri, 2016) y TerrSet® (Eastman, 2020).



**Figura 1.** Pasos comprendidos en la metodología del presente estudio. Fuente: Elaboración propia con información de Warner *et al.* (2021), Eastman (2016) y Bogaert *et al.* (2004).

### A) Elaboración cartográfica

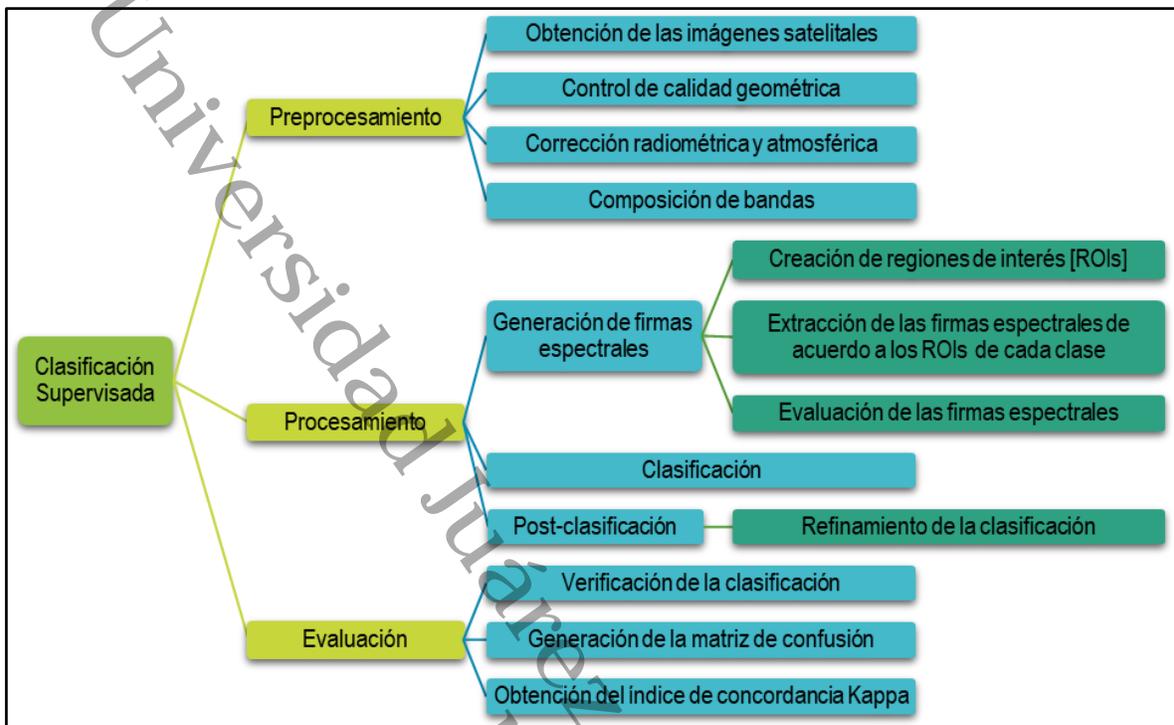
El proceso de elaboración cartográfica para el periodo de estudio se realizó con el uso de imágenes de satélite Landsat 7 ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) para el año 2000 y Landsat 8 OLI/TIRS (Operation Land Imager / Thermal Infrared Sensor) para el año 2020. Se descargaron dos imágenes por año, de tal forma que la extensión del área de estudio fuera cubierta en su totalidad. Las imágenes

que se seleccionaron para ambos años (2000 y 2020) corresponden a la misma temporada estacional de sequías (año 2000 son del 27 de marzo y 3 de abril, mientras que para el año 2020 corresponden al 2 y 11 de abril). Dichas imágenes se obtuvieron del sitio web Global Visualization Viewer [GloVis] del Servicio Geológico de los Estados Unidos [USGS]. En la Tabla 1 se muestran las resoluciones radiométricas y espaciales para los productos de ambas series.

**Tabla 1.** Resolución radiométrica y resolución espacial de las series Landsat 7 ETM+ y Landsat 8 OLI/TIRS (USGS, 2018).

Serie	Resolución Radiométrica		Resolución Espacial (Tamaño del pixel)
	Bits	Bandas	
Landsat 7 ETM+	8	8	Banda 1 (Blue): 30 m
			Banda 2 (Green): 30 m
			Banda 3 (Red): 30 m
			Banda 4 (Near-Infrared): 30 m
			Banda 5 (Short-wave Infrared): 30 m
			Banda 6 (Thermal): 60 m
			Banda 7 (Mid-Infrared): 30 m
			Banda 8 (Panchromatic [PAN]): 15 m
Landsat 8 OLI/TIRS	12 (16 al ser procesada a nivel 1 [L1])	11	Banda 1 (Coastal Aerosol): 30 m
			Banda 2 (Blue): 30 m
			Banda 3 (Green): 30 m
			Banda 4 (Red): 30 m
			Banda 5 (Near-Infrared): 30 m
			Banda 6 (SWIR 1): 30 m
			Banda 7 SWIR 2 (2.11 - 2.29 $\mu\text{m}$ ): 30 m
			Banda 8 (Panchromatic [PAN]): 15 m
			Banda 9 (Cirrus): 30 m
			Banda 10 (TIRS 1): 100 m
			Banda 11 (TIRS 2): 100 m

A partir de la obtención de dichas imágenes satelitales se procedió a realizar los pasos para llevar a cabo una clasificación supervisada, la cual clasifica la imagen a partir de un conocimiento previo del área de estudio (Warner *et al.*, 2021). Las etapas que se siguieron para la realización la clasificación supervisada se observan en la Figura 2 y se explican a continuación.



**Figura 2.** Metodología de la clasificación supervisada a realizar. Fuente: Elaboración propia con información de Warner *et al.* (2021).

### A.1.1) Preprocesamiento

Las imágenes seleccionadas del área de estudio para ambos años tenían un porcentaje de nubosidad <10%, correspondientes a la época de secas debido a que presentan menores fracciones de nubosidad. A pesar de esto, es necesario considerar que las imágenes al ser descargadas poseen interferencias que perturban su información, como podrían ser fallos en el sensor o la presencia de gases y partículas en la atmósfera. Es por esto que fue necesario someterlas a un preprocesamiento digital, el cual consistió en un control de calidad geométrica y correcciones radiométricas y atmosféricas (Chuvieco, 2020).

#### A.1.1.1) Control de calidad geométrica

Las imágenes se descargaron con un nivel de procesamiento L1TP, implicando un procesamiento geométrico, lo que incluye los datos corregidos de precisión y del terreno (USGS, 2019). Sin embargo, debido a que se utilizaron dos imágenes por año para cubrir el área de estudio, éstas tenían diferente sistema de referencia, por lo que fueron reproyectadas al de la imagen que abarcara la mayor superficie del área de estudio, siendo WGS84 / UTM 16 N. Además, puesto que los mapas temáticos resultantes del procesamiento de ambas imágenes se compararon al realizar el cambio de uso de

suelo, fue necesario realizar una validación geométrica para verificar que los pixeles en ambas imágenes al ser superpuestas correspondieran a los mismos puntos geográficos, esto fue posible comprobando un error cuadrático medio [RMSE] menor al tamaño de un pixel (< 30 m). Esto se comprobó en el software Terrset® utilizando el módulo *Resample*, el cual calcula el RMSE después de agregar puntos de control en ambas imágenes que correspondan a los mismos sitios. Los puntos estuvieron distribuidos por la imagen, en zonas fácilmente identificables y que no presentaran variación en el tiempo, como son las intersecciones o los puentes (Warner *et al.*, 2021). El resultado fue un valor de RMSE= 19.32 m, por lo que las imágenes pudieron ser utilizadas en el estudio (Kardoulas *et al.*, 1996).

#### A.1.1.2) Corrección radiométrica

Los pixeles de la imagen tienen valores asignados que reciben el nombre de números digitales [ND]. Éstos representan la radiación electromagnética proveniente del Sol, dispersada por la atmósfera y reflejada por la superficie. Los números digitales son valores relativos no calibrados, ya que varían entre cada imagen satelital debido a la iluminación y a las condiciones atmosféricas presentes al momento de su toma (Ambrosio *et al.*, 2002). Debido a esto, para que la información de los ND pueda ser utilizada al comparar ambas imágenes, deben ser convertidos a reflectancia, ya que es la fracción de la radiación que es reflejada por la superficie intrínsecamente. Esta transformación eliminará el efecto del ángulo solar, que varía con el tiempo de adquisición, y compensará los valores de irradiancias solares exoatmosféricas, que igualmente pueden variar por las diferencias de las bandas (Chuvieco, 2020). Sin embargo, para que pudieran ser convertidos a reflectancia, los ND fueron transformados primero a valores de radiancia utilizando la herramienta de *Calibración Radiométrica* del programa ENVI® 5.3, en donde igualmente se realizó el corte a dimensión utilizando un archivo vectorial del área de estudio descargado de INEGI (2016). Dicha herramienta realiza la conversión a radiancia utilizando las ganancias (gains) y compensaciones (offsets) de radiancia, valores que se encuentran en los metadatos de cada imagen, en la siguiente fórmula:

$$L_{\lambda} = Gain * Valor\ del\ pixel + Offset$$

En donde  $L_{\lambda}$  es radiancia en unidades de  $W / (m^2 * sr * \mu m)$ .

Con dicha información fue posible la conversión a reflectancia, la cual se realizó basándose en la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{\pi * L_{\lambda} * d^2}{\cos\theta * E_{SUN}}$$

En donde  $\rho$  es reflectancia aparente,  $d$  es la distancia de la Tierra al Sol en unidades astronómicas,  $E_{SUN}$  es la irradiancia solar espectral ( $W/m^2/\mu m$ ) y  $\theta$  es el ángulo cenital solar el cual es calculado a partir del ángulo de elevación del sol, información que se puede obtener de los metadatos de las imágenes.

#### **A.1.1.3) Corrección atmosférica**

La corrección atmosférica consiste en corregir el efecto de la dispersión de la radiación electromagnética provocada por gases y partículas presentes en la atmósfera, que distorsionan los valores de radiancia que captura el sensor (Chuvieco, 2020). Esta corrección se realizó utilizando la herramienta *FLAASH*, la cual como resultado genera una imagen con los valores de reflectancia superficial. *FLAASH* utiliza el modelo *MODTRAN*, un modelo físico de transferencia radiativa que se basa en la simulación de las condiciones atmosféricas en función de su fecha de adquisición y los parámetros fisicoquímicos de la atmósfera presente. Estos últimos fueron tomados de acuerdo con el modelo de atmósfera "Tropical", uno de los modelos estándar de atmósfera predefinidos por *MODTRAN*, seleccionado de acuerdo a la temperatura promedio y latitud del área de estudio (Exelis Visual Information Solutions Inc., 2015). *MODTRAN* igualmente incluye elementos para estimar los efectos de la absorción, emisión y dispersión de gases y partículas, reflexión y emisiones superficiales, iluminación solar y refracción esférica (Spectral Sciences Inc., 2016).

#### **A.1.1.4) Mosaico**

Debido a que se necesitaban dos imágenes por cada año para cubrir el área de estudio, se realizó un mosaico para ambos años con la herramienta *Seamless Mosaic* de ENVI®. Esta herramienta empareja las características de cada escena tomando una como base y ajustando la otra para generar una imagen más grande, permitiendo una mejor consistencia en el color y tono entre ambas al unir (Exelis Visual Information Solutions Inc., 2015).

Debido a la diferencia de fechas entre las imágenes a utilizar para cada año, y a pesar de haber realizado una corrección atmosférica previa, al unir ambas imágenes para cubrir el área de estudio existía una diferencia en el color notable. Es por esto que el mosaico de las imágenes se realizó seleccionando un emparejamiento del histograma, tomando como base las imágenes del lado derecho por ser las que abarcan mayor superficie del área de estudio. Se utilizó un valor de difuminado de 500

pixeles entre ambas imágenes, permitiendo una mejor apariencia final al hacer la composición y se seleccionó el método de vecino más cercano, el cual selecciona un pixel cercano para crear la imagen final sin considerar interpolación.

#### A.1.1.5) Composición de bandas

Cada banda del sensor registra información de acuerdo con diferentes rangos de frecuencias del espectro electromagnético, lo que genera imágenes en escala de grises poco usuales para el procesamiento de forma individual. Es por esto que las imágenes se deben componer en falso color mediante la combinación de los canales RGB (rojo, verde y azul), ya que facilita la observación de información que el ojo humano es incapaz de percibir en una imagen en color verdadero (Franco, 2017). La composición de las bandas a utilizar fue: Red- NIR- SWIR 1 (3,4, 5 en Landsat 7 y 4,5,6 en Landsat 8) ya que es aplicada en estudios de clasificación de coberturas debido a la diferenciación entre los distintos tipos de vegetación, suelo y agua, así como de las áreas urbanas y suelos expuestos (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 1993). Este proceso se realizó con la misma herramienta utilizada para hacer el mosaico, *Seamless Mosaic*, al exportar el resultado y seleccionar como bandas de salida la combinación de bandas mencionada anteriormente para formar una imagen multiespectral final.

#### A.2) Procesamiento

Consiste en someter las imágenes a procedimientos para convertir su información en mapas temáticos y obtener análisis estadísticos de acuerdo con los objetivos del estudio. El procesamiento de imágenes consistió en cuatro etapas (Figura ), mismas que se describen a continuación.



Figura 3. Etapas del procesamiento de la imagen. Fuente: Elaboración propia en base a Warner *et al.* (2021)

#### A.2.1) Definición de las clases

Para la elección de las clases en el presente estudio se tomó como referencia lo establecido en el POET del municipio de Escárcega (2015) y el Inventario Estatal Forestal y de Suelos Campeche (SEMARNAT y CONAFOR 2014). Las clases que se utilizaron y las coberturas que se incluyen en

cada una se muestran en la Tabla 2. Del total de clases en ambos documentos utilizados como referencia, estas se agruparon en seis clases, mismas que se describen a continuación en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Descripción de las clases a utilizar en el estudio. Elaborado con información de INEGI, 2016.

Uso/Cobertura	Descripción
Agropecuario	Incluye pastizales cultivados y naturales, agricultura de riego y de temporal, dentro de las que destacan el cultivo de palma de aceite, maíz, calabaza y cítricos.
Asentamiento humano	Infraestructura urbana (población con más de 2 500 habitantes), rural (población con más de 250 habitantes) e industrial, como plantas eléctricas y graveras.
Cuerpo de agua	Lagunas y ríos.
Vegetación arbustiva	Incluye a los acahuals arbustivos así como la selva baja espinosa, la cual se distribuye en bajos inundables y suelos planos arcillosos, caracterizada por arboles bajos con troncos torcidos, con alturas entre los 5 y 11 m, plantas trepadoras, epífitas, ciperáceas y gramíneas.
Vegetación arbórea	Superficies que incluyen acahuals arbóreos, selvas subperennifolias y selvas subcaducifolias, conformadas por arboles con altura entre los 15 y 30 m.
Vegetación hidrófila	Incluye popales, formados por vegetación herbácea flotante y uni-estratificada de 1 a 2 m de altura; así como tulares, usualmente ubicados en áreas pantanosas, canales y remansos de ríos, conformados por plantas arraigadas al fondo que van desde los 80 cm a los 2.5 m de altura.

### **A.2.2) Construcción de firmas espectrales**

Se le llama firma espectral al patrón de respuesta espectral característico de una cobertura, ya que cada tipo de cobertura dentro de la imagen interactúa diferentemente con un área del espectro electromagnético (Eastman, 2016). Estas firmas son necesarias para realizar la posterior clasificación, ya que su información espectral sirve como base para identificar la clase a la que pertenece cada pixel en la imagen. En la Figura 4 se simplifica el proceso de construcción de firmas.

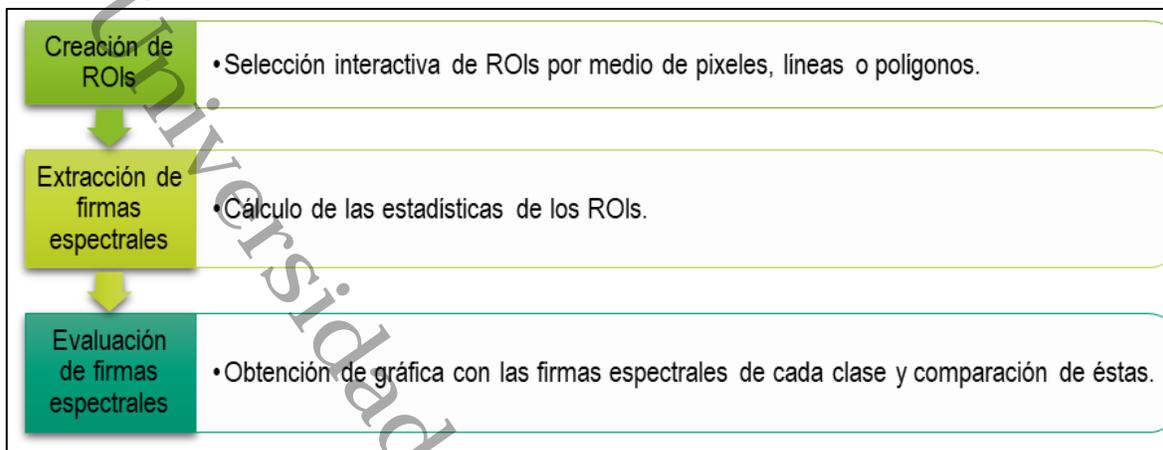


Figura 4. Proceso para la construcción de firmas espectrales de las clases utilizadas.

### A.2.2.1) Creación de ROIs

Los ROIs son áreas muestra de un ráster identificadas para un propósito en particular, por lo que se pueden utilizar como medio para la extracción de firmas espectrales de las clases para una posterior clasificación (Exelis Visual Information Solutions Inc., 2015). La creación de los ROIs se llevó a cabo utilizando la herramienta en ENVI® *Region of Interest (ROI) Tool*, la cual permite seleccionar interactivamente píxeles como regiones de interés, mediante el uso de polígonos, elipses y puntos. Se colocaron ROIs para cada clase en una capa sobre las imágenes RGB, donde el tipo de cobertura fuera conocido y representativo, de acuerdo con los criterios de interpretación visual propuestos por Chuvieco (2010), los cuales son brillo, color, tamaño, forma, patrón, contexto espacial y aspectos temporales. El uso de estos criterios permitió diferenciar categorías que poseen un comportamiento espectral similar pero que tienen un significado temático diferente. Se procuró registrar la variabilidad existente de las coberturas, formando polígonos con información homogénea y evitando incluir píxeles que pertenezcan a coberturas aledañas. Para la imagen del año 2000 se eligieron 85 393 píxeles como ROIs, mientras que para la imagen del 2020 estos fueron 99 751 píxeles (Tabla 3).

Tabla 3. Datos de las estadísticas de los ROIs de la cantidad de píxeles seleccionados por clase.

Cobertura/Usos de Suelo	Número de Píxeles	
	Año 2000	Año 2020
Agropecuaria	14 999	38 980
Asentamiento Humano	2 218	2 415
Cuerpo de Agua	1 293	273
Vegetación Arbórea	37 085	32 620
Vegetación Arbustiva	24 864	19 967
Vegetación Hidrófila	4 934	5 496
<b>TOTAL</b>	<b>85 393</b>	<b>99 751</b>

### A.2.2.2) Extracción y evaluación de las firmas espectrales

Es necesario asegurar que las coberturas puedan clasificarse correctamente, ya que, si dos o más coberturas poseen firmas espectrales con valores similares, existe la posibilidad que el algoritmo de clasificación no separe correctamente los valores de cada clase, generando una mala clasificación. Para su extracción y evaluación se empleó la herramienta *Statistics for All ROIs*, cuyo algoritmo permite comparar las firmas espectrales extraídas de una forma gráfica de acuerdo con el patrón de respuesta espectral de reflectancia promedio, facilitando la detección de firmas similares. Un indicador que las clases se pueden confundir en la clasificación es la sobreposición de las firmas espectrales en dicho gráfico. Es por esto que se crearon suficientes ROIs para cada clase, es decir, hasta abarcar las diferentes variaciones que pudieran tener las clases, permitiendo la mejor separación espectral posible, logrando así obtener una firma espectral mejor definida para cada clase que no se pudiera confundir con otra (Tabla 3).

En las Figuras 5 y 6 se puede observar el comportamiento espectral de las clases consideradas en el estudio. Como se puede notar, la clase correspondiente a la vegetación arbórea demostró superposición, sin embargo, existió separabilidad en las tres bandas por lo que fue posible lograr una buena diferencia entre las clases. Por otra lado, la clase *Vegetación Hidrófila* no pudo ser separada efectivamente de la clase *Agropecuaria*, lo que se puede explicar con la temporalidad de las imágenes, las cuales son correspondientes a un clima seco, pudiendo ocasionar que la vegetación hidrófila se confunda espectralmente con ciertos cultivos. Por el contrario, la clase *Asentamiento Humano*, a pesar de que se observa gráficamente separada de las demás clases espectralmente, al aplicar el algoritmo clasificador esta era confundía con la clase *Agropecuaria*, lo que ocasionaba una baja precisión en el mapa al momento de realizar la evaluación. Esto pudiera deberse a que el gráfico indica solo las medias de la información espectral contenida en los ROIs, sin embargo, debido a que se trató de abarcar la variabilidad de las clases y que el uso agropecuario es una clase muy heterogénea, existen pixeles en ambas clases que pueden tener valores similares en reflectancia. Esto se puede explicar por el tipo de suelo en el área de estudio, el cual es de roca caliza, por lo que es muy probable que en términos de reflectancia los cultivos tomen un aspecto similar al de un asentamiento humano cuando estos quedan sin cultivar, como ocurre con los cultivos de temporal. Considerando que además son fácilmente identificables por su ubicación geográfica, las clases *Vegetación Hidrófila* y *Asentamiento Humano* fueron eliminadas de la clasificación supervisada y agregadas mediante un proceso de digitalización en la imagen resultante del proceso de clasificación supervisada.

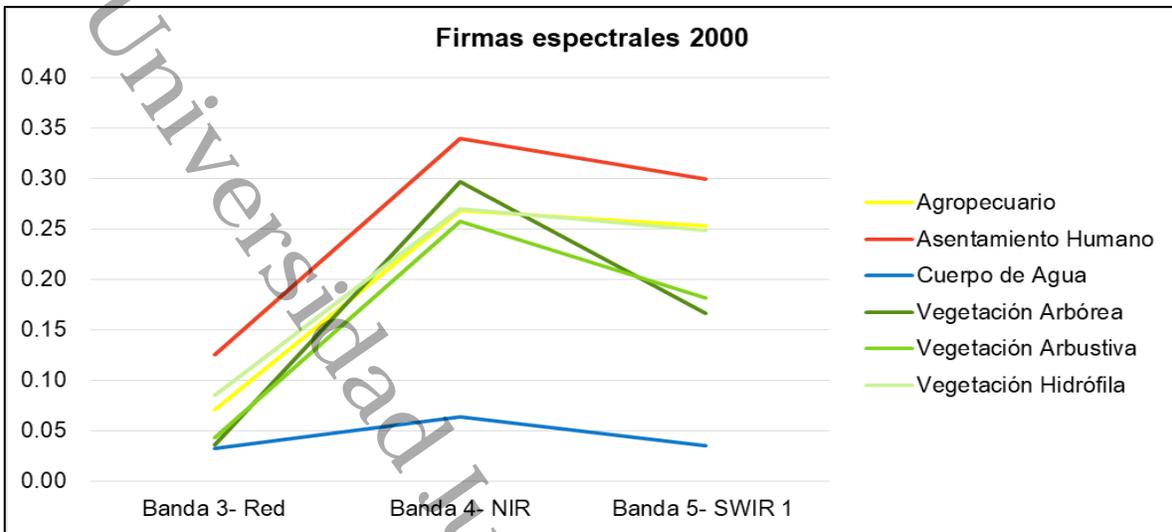


Figura 5. Medias de las firmas espectrales por clase de la imagen correspondiente al año 2000. Datos obtenidos a partir de las bandas de imágenes Landsat 7.

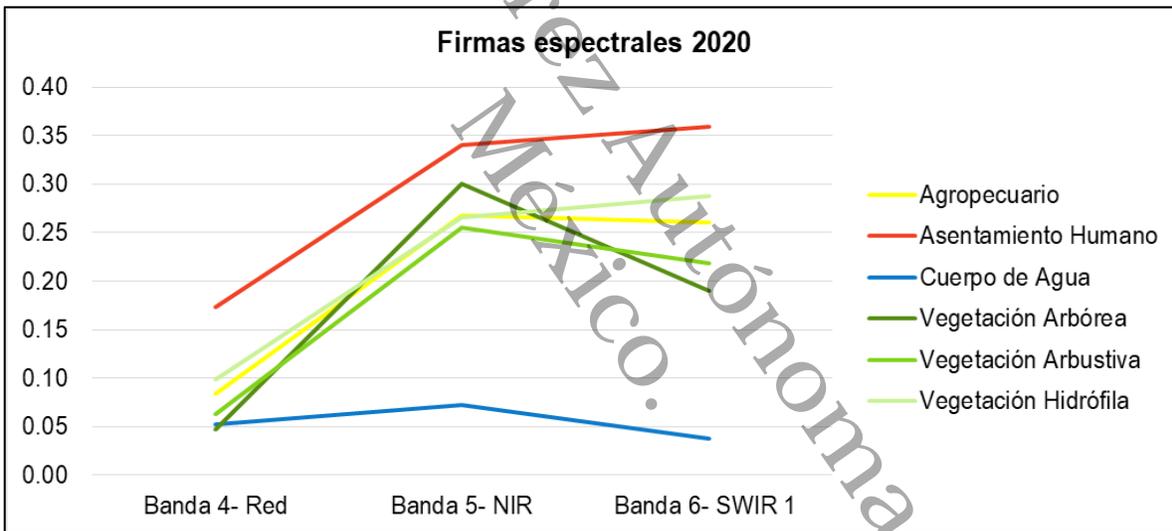


Figura 6. Medias de las firmas espectrales por clase de la imagen correspondiente al año 2020. Datos obtenidos a partir de las bandas de imágenes Landsat 8.

### A.2.3) Clasificación de la imagen

Existen dos tipos de clasificadores, los suaves y los rígidos, los primeros asignan varias clases a cada pixel, mientras que los últimos solo le asignan una sola clase. En este caso se utilizó el algoritmo de máxima probabilidad, el cual es un clasificador rígido que funciona correctamente cuando las estadísticas para cada clase en cada banda se distribuyen normalmente y existe un tamaño de muestra grande. Dicho algoritmo utiliza la información de los ROIs y el promedio y la varianza/covarianza de las firmas espectrales, para calcular la probabilidad de que un pixel pertenezca a determinada clase (Chuvieco, 2020). Este paso se realizó en ENVI® usando la herramienta

*Maximum likelihood classification*, dentro de esta se seleccionaron los ROIs correspondientes a cada clase, se utilizó un único umbral para todas las clases y el factor escala de los datos se definió en 10 000, debido a que es el valor de señalado para información en reflectancia (Exelis Visual Information Solutions Inc., 2015).

#### **A.2.4) Post-clasificación**

Fue necesario realizar pasos post-clasificación en donde se agregarán las dos clases faltantes, así como para mejorar los resultados de la clasificación obtenida. Esto último debido a que el algoritmo por máxima probabilidad otorga un valor a cada pixel en toda la imagen, dando como resultado un mapa temático con efecto visual de aerosol en donde no es fácil apreciar los errores visualmente. A continuación, se describen detalladamente ambos pasos.

##### **A.2.4.1) Refinamiento de la clasificación**

Puesto que se ha demostrado que utilizar herramientas para refinar o suavizar la clasificación aumenta la precisión del resultado hasta un 33 %, se hizo uso de la herramienta *Classification Aggregation* en ENVI®, la cual agrega pequeñas regiones de clases a una región más grande de otra clase adyacente (Exelis Visual Information Solutions Inc., 2015). Se seleccionó un tamaño mínimo para estas regiones de 6.2 ha, ya que es lo recomendado por la bibliografía como unidad mínima mapeable al usar imágenes Landsat 7 y 8 (Marquina y Mogollón, 2018). Al obtener el resultado de este proceso, se convirtió el mapa a vector para de esta manera lograr agregar las clases faltantes.

##### **A.2.4.2) Inclusión de clases faltantes**

Los resultados de la clasificación y su refinamiento proporcionan una imagen en formato ráster, un tipo de formato que se diferencia del formato vectorial debido a que almacena la información en una cuadrícula de pixeles. Como era necesario modificar las clases obtenidas aplicando herramientas creadas para manejar vectores, en el programa QGIS® se realizó una vectorización, es decir la conversión de formato ráster a formato vectorial. Esto debido a que dicho formato permite la aplicación de los geoprocursos necesarios para la inclusión de clases faltantes, los cuales fueron diferentes para cada una de ellas y fueron realizados en el programa QGIS®.

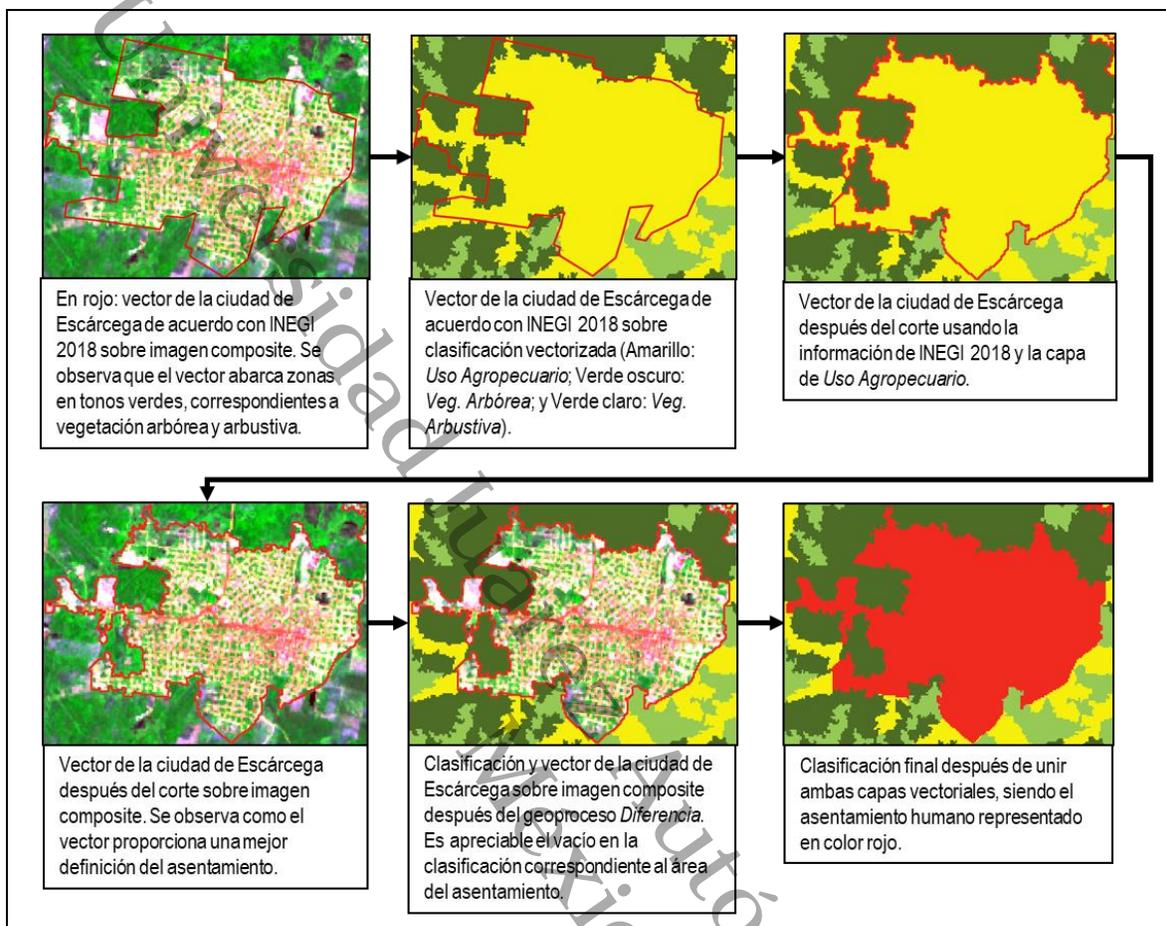
En el caso de la clase de *Vegetación Hidrófila* sus segmentos habían sido considerados dentro de la clase *Agropecuaria* por el algoritmo de clasificación, por lo que se dividieron manualmente y se

reclasificaron de acuerdo con los criterios de interpretación visual propuestos por Chuvieco (2010) mencionados anteriormente.

En el caso de la clase de *Asentamientos Humanos*, los datos fueron descargados de las cartas de uso del suelo y vegetación serie II (2001) y serie VII (2018) del INEGI, de la cual se extrajeron los polígonos que representan los Asentamientos Humanos pertenecientes al municipio de Escárcega, integrando asentamientos urbanos (población mayor a 2 500 habitantes) y rurales (población mayor a 250 habitantes). Esta información vectorial debía ser agregada a la clasificación por lo que se recurrió a una serie de geoprocursos para obtener el mayor parecido a la realidad en la clasificación final.

Primero se verificó que la capa de asentamientos del INEGI fuera precisa al compararse con las superficies reales en la imagen satelital. Debido a que se notó diferente a la realidad, se modificó utilizando la capa extraída de la clase *Agropecuaria*, ya que en esta se habían clasificado los asentamientos humanos por lo que tenía bordes más cercanos a la realidad. Posteriormente, se recortó la capa de asentamientos de acuerdo a la capa de *Agropecuaria*, eliminando las partes excedentes que no correspondían a asentamientos. Así mismo, se identificaron pequeñas áreas clasificadas fuera de la clase *Agropecuaria* pero que en la realidad pertenecían a asentamientos, por lo que fueron divididas y reclasificadas manualmente. Después, para evitar solapamiento de las capas, se extrajo de la clasificación las partes coincidentes a la nueva capa de *Asentamientos Humanos*, dejando espacios vacíos en la capa de la clasificación. Seguidamente se realizó la unión de ambas capas con la herramienta *Unir capas vectoriales*, cuyo algoritmo permite la combinación de múltiples capas vectoriales en una sola junto con su información en las tablas de atributos. Estos pasos son demostrados gráficamente para su mejor comprensión en la Figura 7.

Una vez agregadas ambas clases faltantes, se procedió a modificar la tabla de atributos de modo que se eliminaran los campos innecesarios y agregar un campo para asignar un valor interger a cada clase (ID). Posterior a esto, se procedió a verificar su topología en ArcGIS®, en donde se buscaron y eliminaron los errores existentes, como lo fueron solapamientos y huecos, es decir, espacios sin información dentro del vector. Finalmente se convirtió el archivo vectorial a ráster para que se pudiera analizar la precisión de la clasificación.



**Figura 7.** Demostración de geoprocesos aplicados a las capas de la clasificación como parte de la post-clasificación. Fuente: Elaboración propia a partir del procesamiento digital de imágenes Landsat 8 del año 2020 y cartografía del INEGI (2018).

### A.3) Evaluación de la precisión de la clasificación

La evaluación de la precisión en la clasificación se realizó en tres etapas de acuerdo a la metodología mencionada por Mas y Couturier (2011). La primera etapa es el muestreo, el cual consistió en la selección aleatoria de 75 puntos de verificación por cada categoría, según lo propuesto por Congalton (1991) para un área mayor a 4 047 km<sup>2</sup>. La segunda etapa consistió en la evaluación de cada punto de muestreo para conocer la clase a la que corresponde en realidad. Esto se llevó a cabo mediante observación directa en campo, en donde se realizaron visitas a pie para identificar los tipos de cobertura presentes, tomar coordenadas y fotografías para su posterior análisis, así como mediante el uso de Google Earth, ya que este permite la visualización del área a través de los años. Estas dos etapas fueron realizadas en QGIS®, en donde se creó una capa vectorial en la cual se colocaron automáticamente puntos por toda el área de estudio de forma aleatoria. Una vez que se conocía la

clase a la que pertenecía cada punto, en la tabla de atributos de la capa vectorial se indicaba la clase con el valor interger correspondiente, usando los mismos valores que definían cada clase en el ráster de la clasificación. Cabe mencionar que solo fueron consideradas las clases que se utilizaron en la clasificación con el algoritmo de máxima probabilidad, excluyendo las clases de *Asentamiento Humano* y *Vegetación Hidrófila*, ya que estas fueron agregadas a través de un proceso de digitalización, así como la clase de *Cuerpo de Agua*, ya que esta representa una muy pequeña parte y es fácil de identificarlas espacialmente. Posteriormente en QGIS® se seleccionaron aleatoriamente 75 puntos por cada clase. Siendo que fueron tres clases las analizadas, en total se seleccionaron 225 puntos, integrados en otro archivo vectorial para luego convertirlo a ráster y poder utilizarlo en la siguiente etapa.

En la última etapa, el análisis de datos de fiabilidad, la información de los puntos de verificación se comparó con la obtenida en las imágenes procesadas por medio de una matriz de confusión, la cual tiene como eje vertical los datos obtenidos en campo y en el eje horizontal los adquiridos por la clasificación previa. En el punto donde convergen ambos datos (diagonal principal de la matriz) se encontraron los casos donde las etiquetas de las clases coinciden con la clasificación de la imagen y la información obtenida en campo. Mientras que los que se encontraron fuera de la diagonal principal representan los puntos en donde no concuerdan, es decir, los que han sido clasificados erróneamente (Foody, 2002) (Figura 8).

		Clases asignadas en la clasificación		
		1	2	3
Clases reales	1	P <sub>11</sub>	P <sub>12</sub>	P <sub>13</sub>
	2	P <sub>21</sub>	P <sub>22</sub>	P <sub>23</sub>
	3	P <sub>31</sub>	P <sub>32</sub>	P <sub>33</sub>

**Figura 8.** Ejemplo de matriz de confusión. En verde: puntos que se encuentran clasificados correctamente. En blanco: puntos mal clasificados. Elaboración propia con información de Foody (2002).

Complementariamente se calculó el índice Kappa (K'), el cual permite conocer el nivel de concordancia obtenido. Si el resultado de K' se encuentra entre 0 y 0.2 se considera un grado de acuerdo insignificante, entre 0.21 y 0.4 como mediano, entre 0.41 y 0.6 como moderado, entre 0.61 y 0.8 como sustancial, y si está arriba de 0.81 se define como perfecto (Abraria, 2000). Esta etapa se realizó en Terrset® utilizando la herramienta *Errmat*, cuyo algoritmo genera como resultado una matriz de confusión y el valor del índice K', utilizando el ráster con la información de los puntos aleatorios como

imagen de referencia comparándola con el ráster de la clasificación final. Sobre esta matriz de confusión se calculó el porcentaje de exactitud para determinar la confiabilidad del mapa, utilizando la formula siguiente (Morales-Hernández *et al.*, 2016):

$$Fm = \frac{\sum X_i \times 100}{\sum X_{ij}}$$

Donde  $Fm$  es el porcentaje de exactitud global,  $\sum X_i$  es la sumatoria de los aciertos y  $\sum X_{ij}$  es el total de los puntos muestreados.

Esta misma fórmula es determinada para calcular la *exactitud del productor*, la cual indica que tan bien están clasificados los pixeles en cada clase de acuerdo a los puntos de control; así mismo la *exactitud del usuario*, que indica la probabilidad de que un pixel clasificado en una categoría realmente represente a dicha categoría en campo (Lillesand *et al.*, 2015). Estos valores fueron comparados de acuerdo a lo descrito por Fagan y Defries (2009), quienes valoran como exactitud muy alta si tiene un valor mayor que 90 %, alta si es mayor que 80 %, aceptable si es mayor que 70 %, baja si se encuentra entre el 50 y 70 %, y pobre si es menor que 50 %.

Restando las exactitudes a 100, se pueden calcular los errores de omisión y comisión respectivamente. Siendo que los *errores de omisión* representan los pixeles que pertenecían a una clase dada pero fueron excluidos u omitidos, mientras que los *errores de comisión* indican los pixeles que fueron incluidos pero mal clasificados (Lillesand *et al.*, 2015).

## **B) Cambios de uso del suelo y coberturas entre los años 2000 y 2020**

Una vez realizadas y evaluadas las clasificaciones para ambos años, se utilizó el panel *Landscape Change Process Analysis*, el cual compara los mapas temáticos y permite conocer el área total y la cantidad de parches existentes por cada cobertura. Posteriormente mediante el uso de la herramienta *Crosstab* se realizó un análisis por medio de una tabla cruzada, en donde se estimó el porcentaje de cambio entre ambos tiempos. Igualmente se analizó el índice  $K'$  para conocer la significancia de los cambios. Además de esto, se utilizó el panel *Change Maps*, ya que permite la elaboración de una variedad de mapas de cambios para visualizar las persistencias, ganancias o pérdidas de cada cobertura (Eastman, 2016).

## **C) Tasas de cambio**

Con los datos de ocupación para cada cobertura y tiempo, se calculó la tasa de cambio por cobertura de acuerdo con la fórmula de la FAO (1996):

$$S_n = \left( \frac{S_2}{S_1} \right)^{1/n} - 1$$

Donde  $S_n$  = Tasa de cambio;  $S_1$  = Superficie en tiempo uno;  $S_2$  = Superficie en tiempo dos y  $n$  = Número de años transcurridos entre dos fechas.

#### D) Patrones de cambio

Por último, para evaluar los patrones de cambio se utilizó el panel *Landscape Change Process Analysis*, el cual compara los parches de acuerdo con su número, área y perímetro, ya que son elementos clave para medir los patrones de paisaje. Para ello, el algoritmo utiliza una metodología de árbol de decisiones, comparando el número de parches por cada clase entre los dos tiempos, con los cambios en sus áreas y perímetros (Eastman, 2016). Los parches se clasificaron de acuerdo con procesos espaciales de transformación, los cuales permiten la identificación de pérdida o degradación de cobertura y posibilitan la evaluación del impacto del cambio de patrón en los ecosistemas. Los procesos espaciales de transformación son: *agregación*: combinación de parches; *desgaste*: desaparición de parches; *creación*: formación de un nuevo parche; *deformación*: cambio en la forma del parche; *disección*: subdivisión de un parche; *ampliación*: aumento en el tamaño del parche; *fragmentación*: separación de un parche disparejamente; *perforación*: interrupción de la cobertura continua del parche formando huecos; *cambio*: reposicionamiento del parche; y *contracción*: reducción del tamaño del parche (Bogaert *et al.*, 2004). De esta manera, se determinaron los patrones de cambio de cobertura entre los años 2000 y 2020 en el municipio de Escárcega.

## 7. RESULTADOS

### A) Generación de la cartografía

A partir del análisis de clasificación supervisada se generó la cartografía para el año 2000 y 2020 (Figura 9 y Figura 10). Ambas cartografías cuentan con seis clases. Para ambos tiempos la cobertura con mayor ocupación es la vegetación arbórea y la de menor ocupación fue asentamientos humanos (Tabla 4).

**Tabla 4.** Datos de la composición de los mapas temáticos de los años 2000 y 2020 para el municipio de Escárcega.

Cobertura/Usos de suelo	Año 2000		Año 2020	
	ha	%	ha	%
Agropecuario	56 337.3	11.76	122 214.87	25.50
Asentamiento Humano	2 180.25	0.45	3 157.72	0.66
Cuerpo de Agua	4 910.04	1.02	2 372.58	0.50
Vegetación Arbustiva	138 626.37	28.93	158 447.61	33.07
Vegetación Arbórea	270 579.69	56.47	184 948.67	38.60
Vegetación Hidrófila	6 562.8	1.37	8 055	1.68
TOTAL	479 196.45	100	479 196.45	100

De acuerdo a las matrices de confusión elaboradas (Tabla 5 y 6) se obtuvo un índice de concordancia  $K'$ , de 0.87 y 0.81 respectivamente, lo que se determina también como buena precisión (Abraria, 2000). Con respecto al cálculo de la exactitud global de las cartografías, esta fue de 91.56 % para el año 2000 y 87.11 % para el año 2020, determinadas por Fagan y Defries (2009) como una precisión muy alta y alta respectivamente. En cuanto a las exactitudes del productor y del usuario, en ambos mapas temáticos tienen valores por arriba de lo aceptable (>70 %) de acuerdo con Fagan y Defries (2009), siendo la *Vegetación Arbustiva* en el mapa del año 2020 la única clase con una exactitud del productor abajo del 80 %.

En lo que respecta a los errores la clase *Vegetación Arbustiva* fue la que tuvo mayor error de comisión en ambos mapas. Mientras que la clase *Agropecuario* tuvo el mayor error de omisión en el mapa del año 2000, así como la clase *Vegetación Arbórea* en el mapa del año 2020 (Tabla 5 y 6).

Cabe recordar que, como se mencionó anteriormente, dentro de estas matrices no se incluyeron las capas de *Asentamiento Humano* y *Vegetación Hidrófila* por ser agregadas posteriormente al algoritmo de clasificación, así como también se excluyó la capa de *Cuerpo de Agua* por tener muy pocos polígonos los cuales son fácilmente identificables.

**Tabla 5.** Matriz de error para los puntos de control de las categorías en la clasificación del año 2000 del municipio de Escárcega realizada con imágenes Landsat 7.

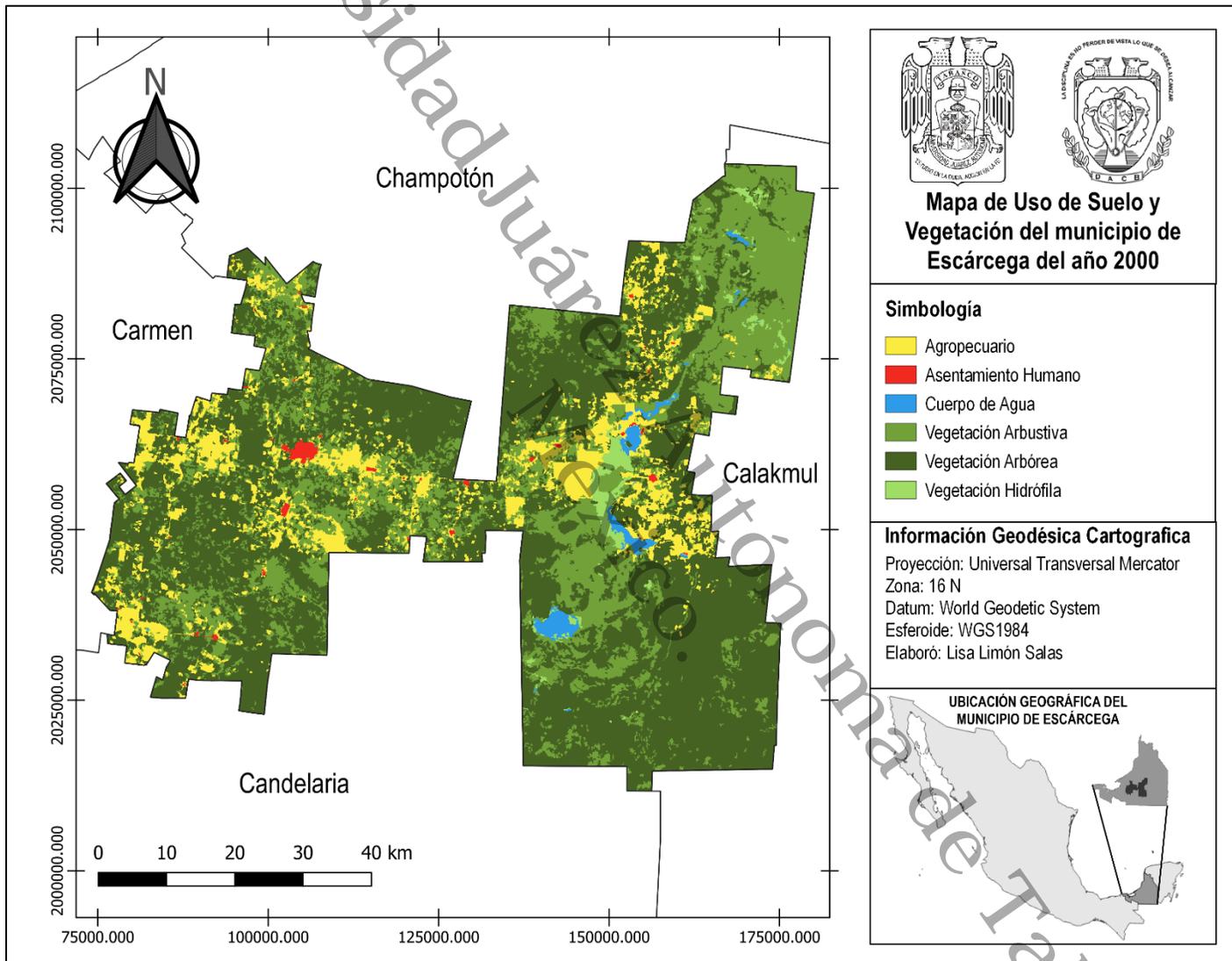
Cobertura/ Uso de Suelo	Agropecuario	Vegetación Arbustiva	Vegetación Arbórea	TOTAL	Exactitud del Productor	Error de Comisión
Agropecuario	<b>68</b>	2	2	72	94.44 %	5.56 %
Vegetación Arbustiva	6	<b>69</b>	4	79	87.34 %	12.66 %
Vegetación Arbórea	1	4	<b>69</b>	74	93.24 %	6.76 %
TOTAL	75	75	75	225		
Exactitud del Usuario	90.67 %	92 %	92 %		<b>91.56 %</b>	
Error de Omisión	9.33 %	8 %	8 %			

Nota: Las clases en vertical son aquellas reales, mientras que las horizontales son las clasificadas por el algoritmo. En negritas se muestran los puntos clasificados correctamente. En cursiva se encuentran los puntos que están erróneamente clasificados. En azul se observa la exactitud global del mapa. La exactitud del usuario representa la probabilidad que un pixel realmente represente a dicha clase. La exactitud del productor representa lo bien que están clasificados los pixeles de acuerdo a los puntos de verificación. Los errores de omisión representan el porcentaje de puntos que pertenecían a dada clase pero fueron excluidos. Los errores de comisión es el porcentaje de puntos incluidos pero mal clasificados (Lillesand et al., 2015).

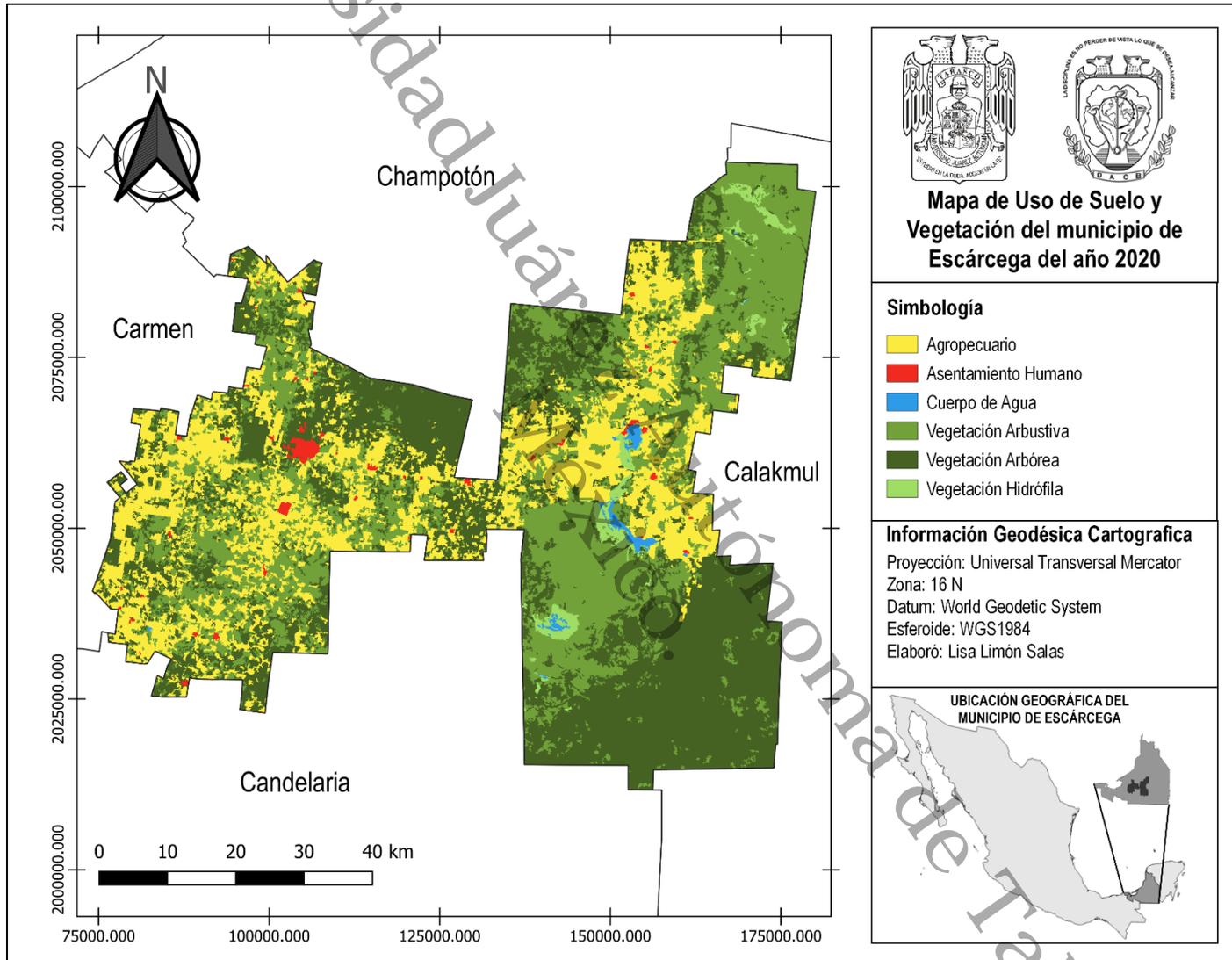
**Tabla 6.** Matriz de error para los puntos de control de las categorías en la clasificación del año 2020 del municipio de Escárcega realizada con imágenes Landsat 8.

Cobertura/ Uso de Suelo	Agropecuario	Vegetación Arbustiva	Vegetación Arbórea	TOTAL	Exactitud del Productor	Error de Comisión
Agropecuario	<b>73</b>	3	1	77	94.81 %	5.19 %
Vegetación Arbustiva	2	<b>63</b>	14	79	79.75 %	20.25 %
Vegetación Arbórea	0	9	<b>60</b>	69	86.96 %	13.04 %
TOTAL	75	75	75	225		
Exactitud del Usuario	97.33 %	84.00 %	80.00 %		<b>87.11 %</b>	
Error de Omisión	2.67 %	16 %	20 %			

Nota: Las clases en vertical son aquellas reales, mientras que las horizontales son las clasificadas por el algoritmo. En negritas se muestran los puntos clasificados correctamente. En cursiva se encuentran los puntos que están erróneamente clasificados. En azul se observa la exactitud global del mapa. La exactitud del usuario representa la probabilidad que un pixel realmente represente a dicha clase. La exactitud del productor representa lo bien que están clasificados los pixeles de acuerdo a los puntos de verificación. Los errores de omisión representan el porcentaje de puntos que pertenecían a dada clase pero fueron excluidos. Los errores de comisión es el porcentaje de puntos incluidos pero mal clasificados (Lillesand et al., 2015).



**Figura 9.** Mapa de uso de suelo y vegetación del municipio de Escárcega del año 2000. Fuente: Elaboración propia a partir del procesamiento digital de imágenes Landsat 7 del año 2000 y cartografía del INEGI (2001).



**Figura 10.** Mapa de uso de suelo y vegetación del municipio de Escárcega del año 2020. Fuente: Elaboración propia a partir del procesamiento digital de imágenes Landsat 8 del año 2020 y cartografía del INEGI (2018).

## B) Cambios en la cobertura y usos de suelo

Se analizaron un total de 6 coberturas durante un periodo de 20 años. Como se muestra en la Figura 11, el mayor cambio neto lo registra la vegetación arbórea, indicando que durante el periodo de estudio se perdieron en promedio 4 281.55 ha anualmente de esta cobertura natural. Por el contrario, el uso agropecuario sufrió el segundo cambio más importante con un aumento en promedio anual de 3 293.90 ha.

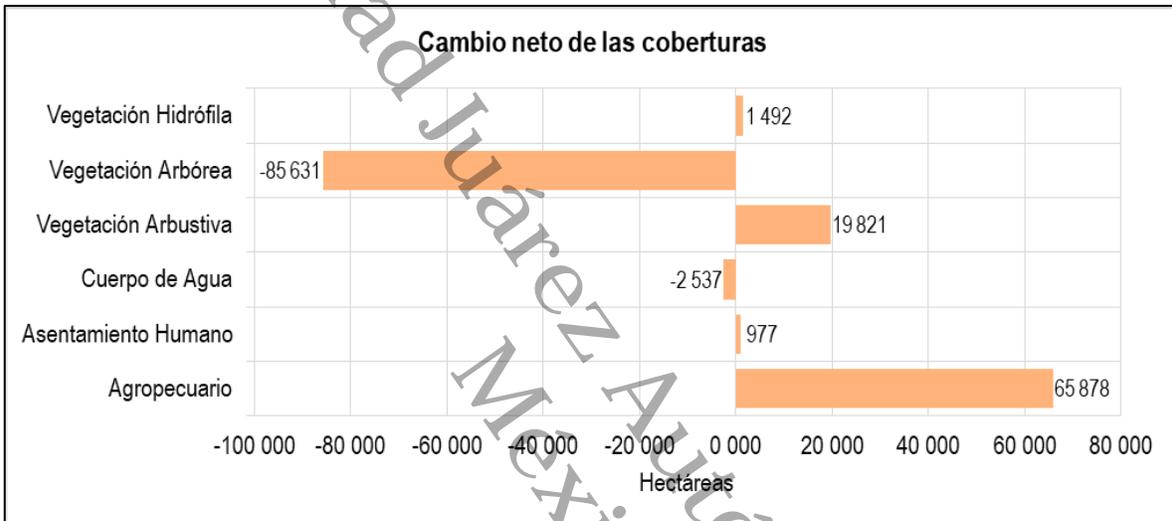


Figura 11. Cambios netos de las coberturas en los mapas temáticos de los años 2000 y 2020 del municipio de Escárcega.

Para comparar si los cambios ocurridos entre el año 2000 y 2020 son significativos se calculó el índice K'. Este índice, como se menciona en la metodología, fue utilizado anteriormente para determinar la concordancia, sin embargo en esta ocasión permitió definir la significancia de los cambios al demostrar alta o baja concordancia entre píxeles de ambos mapas. De esta forma, valores cercanos a uno indican cambios menores o poco significativos, debido a que la información en los píxeles de ambos mapas tienen una concordancia alta, mientras que cercanos a cero representan cambios altamente significativos, siendo que la información en los píxeles de ambos mapas tiene una concordancia menor (Abraría, 2000). Este índice arrojó un valor promedio de 0.39, lo que implica un cambio significativo entre las coberturas. De la misma manera fueron obtenidos los valores del índice para cada cobertura. La cobertura con el índice K' menor fue la correspondiente a la vegetación arbórea, indicando un cambio importante en la cobertura, mientras que la que representó un valor mayor fueron los asentamientos humanos, demostrando un cambio poco significativo entre los dos tiempos (Tabla 7).

**Tabla 7.** Índice Kappa de las coberturas en el estudio.

Cobertura / Uso de suelo	Índice Kappa
Agropecuario	0.68
Asentamiento Humano	0.89
Cuerpo de Agua	0.41
Vegetación Arbustiva	0.40
Vegetación Arbórea	0.30
Vegetación Hidrófila	0.48

Al analizar las contribuciones al cambio de cada cobertura, se encontró que el uso de suelo agropecuario y la vegetación arbustiva son los principales contribuidores de la pérdida de la cobertura arbórea. El uso agropecuario representa el 51.75 % del cambio de la cobertura arbórea mientras que la vegetación arbustiva el 47.68 % (Tabla 8).

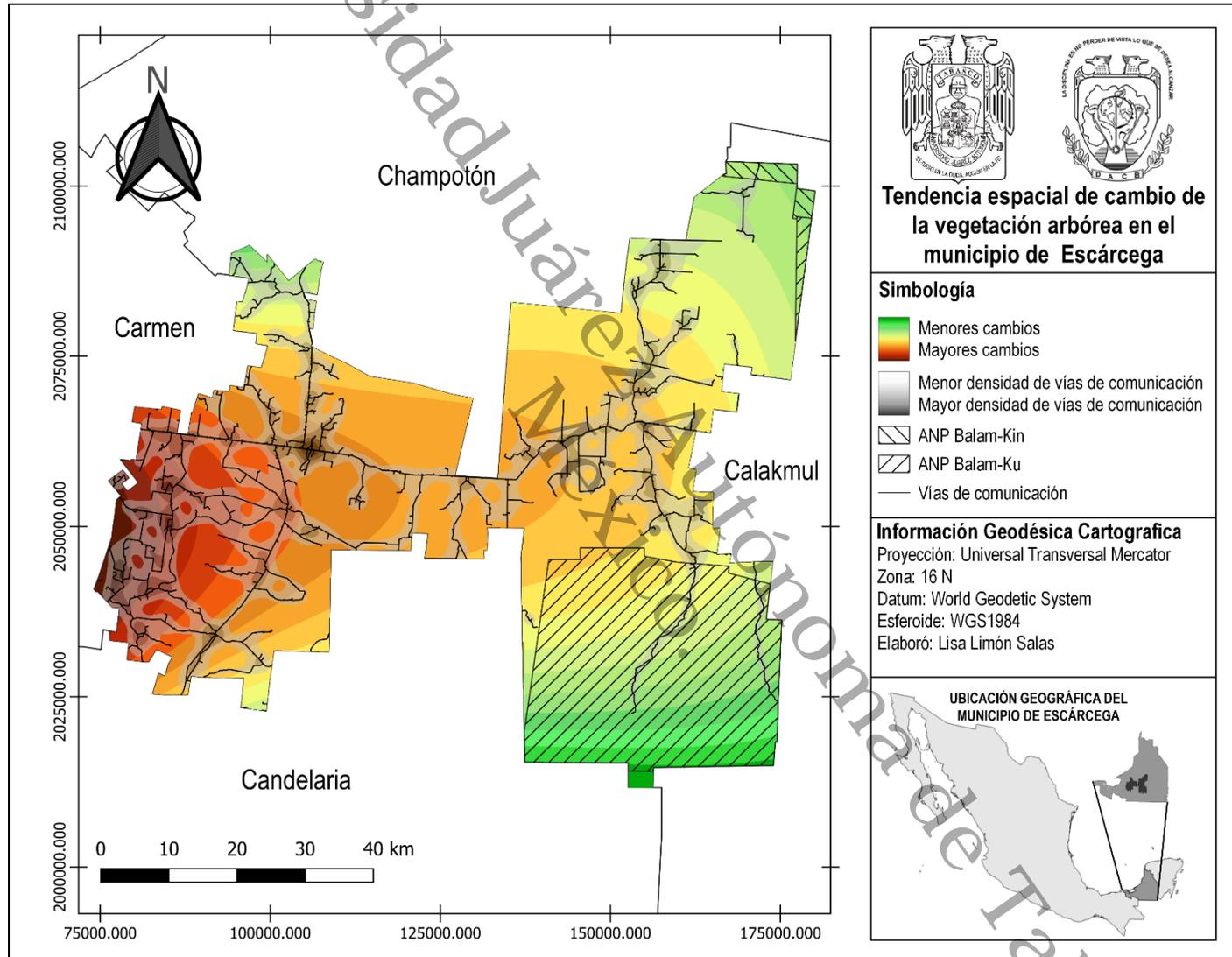
**Tabla 8.** Contribuciones de las coberturas a los cambios netos en los mapas temáticos de los años 2000 y 2020 del municipio de Escárcega. En la tercera columna se encuentra que tanto contribuyó la cobertura en la primera columna al cambio de las coberturas en la segunda columna.

		Contribución al Cambio Neto (ha)
Agropecuario	Asentamiento Humano	500
	Cuerpo de Agua	-216
	Vegetación Arbustiva	-20 308
	Vegetación Arbórea	-44 117
	Vegetación Hidrófila	-1 736
Asentamiento Humano	Agropecuario	-500
	Cuerpo de Agua	0
	Vegetación Arbustiva	-119
	Vegetación Arbórea	-360
	Vegetación Hidrófila	0
Cuerpo de Agua	Agropecuario	216
	Asentamiento Humano	0
	Vegetación Arbustiva	746
	Vegetación Arbórea	0
	Vegetación Hidrófila	1 572
Vegetación Arbustiva	Agropecuario	20 308
	Asentamiento Humano	119
	Cuerpo de Agua	-746
	Vegetación Arbórea	-40 643
	Vegetación Hidrófila	1 145
Vegetación Arbórea	Agropecuario	44 117
	Asentamiento Humano	360
	Cuerpo de Agua	0
	Vegetación Arbustiva	40 643

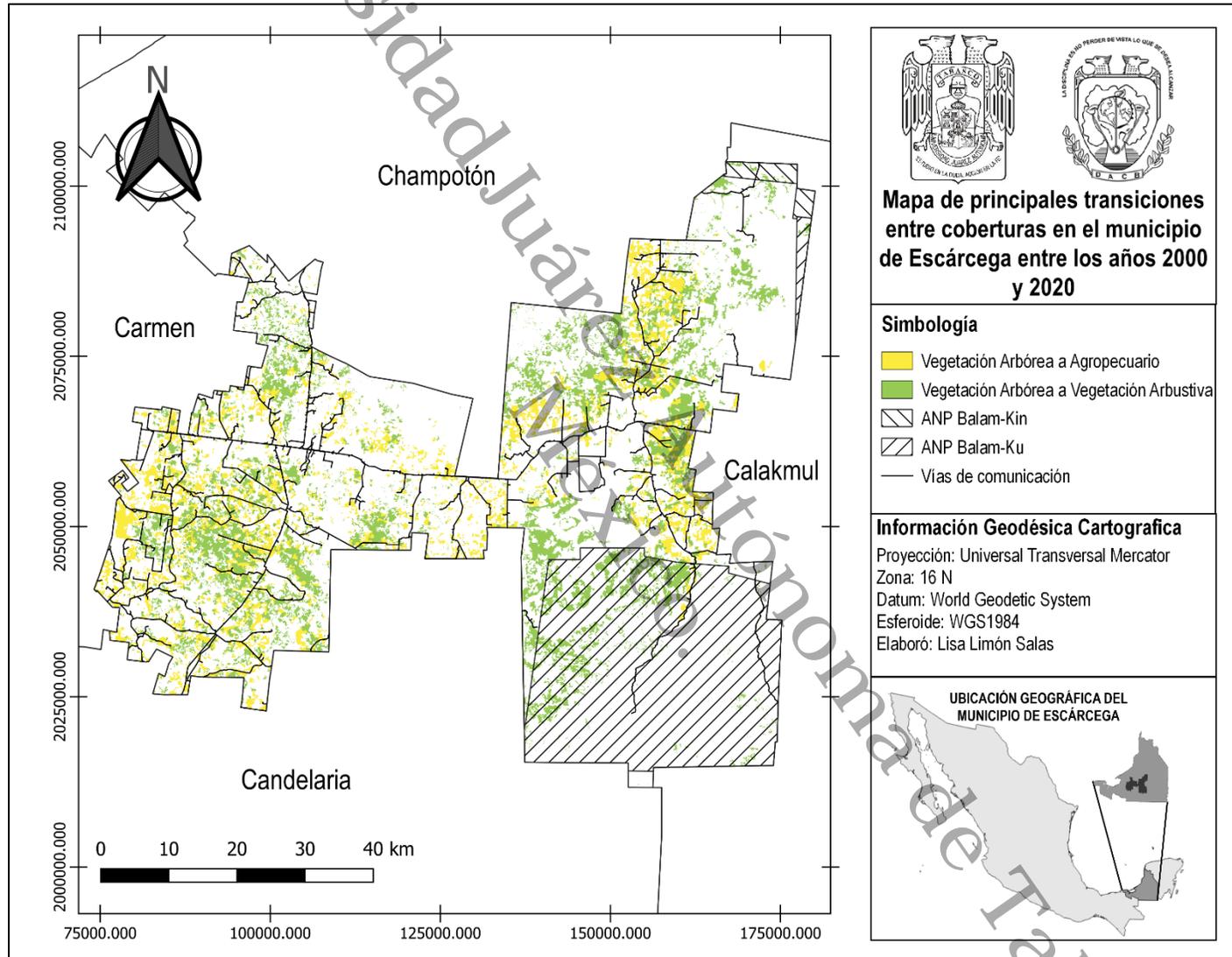
	Vegetación Hidrófila	511
	Agropecuario	1 736
	Asentamiento Humano	0
Vegetación Hidrófila	Cuerpo de Agua	-1 572
	Vegetación Arbustiva	-1 145
	Vegetación Arbórea	-511

Al analizar la tendencia espacial de cambio de la vegetación arbórea, se observó que los mayores cambios ocurren del lado oeste del municipio, en el área colindante con los municipios de Carmen y Candelaria, donde igualmente la densidad de vías de comunicación es mayor (Figura 12). Los menores cambios en la vegetación arbórea se registran hacia el noreste y sureste del área de estudio, colindando con las áreas naturales protegidas de Balam Kin y Balam Kú respectivamente.

Las principales transiciones durante el periodo de estudio se dieron de vegetación arbórea a vegetación arbustiva con 65 392.93 ha, y de vegetación arbórea a uso agropecuario, con 48 803.67 ha (Figura 13). Cabe aclarar que estos valores varían de los expuestos en la Tabla 8, debido a que dicha tabla muestra las ganancias menos las pérdidas de cada clase para conocer el cambio real, mientras que en las transiciones se toma en cuenta la cantidad de superficie transformada a otra clase, es decir, de las ganancias de la clase actual, cuál es la cantidad que pertenecía la clase anterior.



**Figura 12.** Tendencia espacial de cambio en tercer orden polinomial de la Vegetación Arbórea en el municipio de Escárcega (2000-2020). Fuente: Elaboración propia a partir del procesamiento digital de imágenes Landsat 7 y Landsat 8, e información del INEGI (2018) y CONANP (2020).



**Figura 13.** Mapa de principales transiciones entre coberturas en el municipio de Escárcega entre los años 2000 y 2020. Fuente: Elaboración propia a partir del procesamiento digital de imágenes Landsat 7 y Landsat 8, e información del INEGI (2018) y CONANP (2020).

### C) Tasas de cambio

La tasa de cambio anual para las coberturas se puede observar en la Tabla 9. Estas expresan un proceso de reducción en las coberturas correspondientes a cuerpos de agua y a vegetación arbórea, las cuales registraron tasas anuales de cambio negativas de -3.57 % y -1.88 % respectivamente. Por el contrario, las demás coberturas demuestran expansión, siendo el uso agropecuario y el asentamiento humano las coberturas con mayores tasas de cambio anual, con 3.95 % y el 1.87 % respectivamente.

**Tabla 9.** Superficie y tasas de cambio anual por tipo de cobertura del municipio de Escárcega para el periodo de tiempo entre los años 2000 y 2020.

Cobertura	Año 2000 (ha)	Año 2020 (ha)	Tasas de cambio anual (%)
Agropecuario	56 337.3	122 214.87	3.95
Asentamiento Humano	2 180.25	3 157.72	1.87
Cuerpo de Agua	4 910.04	2 372.58	-3.57
Vegetación Arbustiva	13 8626.37	158 447.61	0.67
Vegetación Arbórea	270 579.69	184 948.67	-1.88
Vegetación Hidrófila	6 562.8	8 055	1.03

### D) Patrones de cambio

Se determinaron un total de cuatro patrones de cambio, siendo la mayoría procesos de “agregación”, lo que indica la fusión de parches existentes, para las coberturas de uso agropecuario, vegetación arbustiva y vegetación hidrófila. La cobertura de cuerpos de agua indicó un proceso de “desgaste”, lo que implica las pérdidas en la cantidad de parches. Mientras que la vegetación arbórea representó un proceso de “fragmentación”, denotando que las cubiertas continuas fueron divididas en parches desiguales.

## 8. DISCUSIÓN

El estado de Campeche es uno de los estados con menor densidad de población en México (INEGI, 2020); sin embargo, ha sido de los más impactados por los cambios de uso de suelo, con un total de 235 000 ha deforestadas entre los años 2000 y 2010, siendo el municipio de Escárcega uno de los más afectados (CONAFOR, 2014; Ellis *et al.*, 2015). Los resultados del presente estudio demuestran la pérdida de vegetación arbórea en dicho municipio impulsada principalmente por el uso agropecuario del suelo. Siendo que la vegetación arbórea presente en el municipio está compuesta en su mayoría por selvas, los resultados coinciden con lo publicado por la SEMARNAT (2012), quien cataloga a las selvas como aquellas coberturas con las mayores pérdidas nacionalmente, mientras que la ganadería y la agricultura aumentan en superficie. De igual forma, los resultados son consistentes con lo mencionado por Rendón-von Osten y Villalobos-Zapata (2010), quienes señalan a la intensificación agrícola y a la ganadería extensiva como los principales causantes de los cambios de uso de suelo en el municipio, así como las mayores amenazas de pérdida de hábitat en el estado.

Aunque la evidencia de estudios de cambio de uso de suelo en el municipio de Escárcega es escasa, los resultados obtenidos pudieron ser comparados con lo descrito en el POET (2015), el cual se basa en un estudio de cambio de uso de suelo en Escárcega entre los años 1976 y 2003, donde la mayor pérdida fue la de la cobertura arbórea. Sin embargo, los resultados no se equiparan en la pérdida anual de la cobertura arbórea, ya que para dicho periodo de tiempo (1976-2003) se perdían anualmente 2 797.90 ha, mientras que para el periodo incluido en el presente estudio (2000-2020) la pérdida anual se ha multiplicado 1.53 veces más (4 281.55 ha).

De acuerdo con el índice Kappa, calculado para conocer las coberturas con mayores cambios, la cobertura arbórea representó los cambios más significativos ( $K'=0.30$ ). Estos resultados contrastan con lo reportado por otros estudios a finales de los 90 y principios de los 2000 en la Península de Yucatán, a la que pertenece el área de estudio, en donde la vegetación arbórea representaba los menores cambios (Cortina-Villar *et al.*, 1998; García-Gil *et al.*, 2001).

El principal patrón de cambio que han experimentado las selvas en México es la fragmentación (Moreno-Sánchez *et al.*, 2011). Esto concuerda con lo obtenido en los resultados del presente estudio, en donde la cobertura arbórea presenta un patrón de fragmentación, el cual implica el incremento del número de sus fragmentos y una reducción de su superficie, principalmente relacionado a un cambio a uso agropecuario del suelo. Además, Cortina-Villar *et al.* (1998) en una investigación que incluía

parte del municipio de Escárcega, demostraron cómo el aumento de la agricultura favoreció la deforestación entre los años 1975 y 1990. Dichos resultados son similares a los obtenidos en el presente trabajo, en donde el uso agropecuario fue causante de la mayor pérdida de cobertura arbórea (44 117 ha) en los 20 años de estudio. Sin embargo, los autores reportaron en dicho estudio que la deforestación por la creciente expansión de la ganadería y agricultura se detuvo por restricciones naturales (edafología e hidrología), la crisis económica de la década de los ochenta y la organización de los ejidatarios para el mejor aprovechamiento de las áreas forestales.

A nivel espacial, los menores cambios se centran en las áreas colindantes con el municipio de Calakmul y con las ANP's Balam Ku y Balam Kin (Figura 9), concordando con Figueroa y Sánchez-Cordero (2008), quienes reportan como las áreas naturales bajo protección previenen mejor los cambios de uso de suelo a nivel nacional. Así como lo descrito por Ellis *et al.* (2017), quienes mencionan que en el municipio de Calakmul los procesos de deforestación tienen una tendencia a la reducción respecto al resto del estado. Estos resultados coinciden con lo reportado por la CONAFOR 2020, en donde se observa que los mayores cambios para la cobertura arbórea en el municipio de Escárcega ocurren al suroeste del mismo, área que colinda con los municipios de Carmen y Candelaria y pertenece a las zonas críticas de deforestación, no solo en la Península de Yucatán, sino en todo el país. En esta zona, la transformación de la cobertura arbórea ha sido impulsada por condiciones naturales que favorecen a las actividades agropecuarias, como lo son suelos con posibilidad de ser arados y un manto freático a baja profundidad, situación que contrasta con la frontera con el municipio de Calakmul, en donde las posibilidades de implementar la agricultura y ganadería son bajas debido al suelo pedregoso y la poca disponibilidad de agua (Cortina-Villar *et al.*, 1998).

Es importante resaltar el impacto de las vías de comunicación en los cambios de uso de suelo, ya que a nivel mundial son una de las principales amenazas a la biodiversidad, reduciendo la cantidad y calidad de los hábitats naturales (Geneletti, 2003). Esto debido a que la construcción de carreteras y caminos afecta a la continuidad de la vegetación natural, además de provocar como efecto alternativo la pérdida y alteración de los ecosistemas (SEMARNAT, 2012). La conversión de las selvas en la Península de Yucatán se ve enfocada principalmente a lo largo de las carreteras (Ellis *et al.*, 2015). A pesar de que no se realizó ningún análisis con las vías de comunicación como variable para analizar su influencia en los cambios de uso de suelo, es apreciable visualmente en la Figura 9 la relación entre la densidad de las vías de comunicación y los principales cambios de la cobertura arbórea en el municipio de Escárcega.

Por otro lado, las tasas de cambio de la cobertura arbórea registradas a nivel nacional han demostrado variación en los últimos años. A pesar de que la FAO (2020) determinó una tasa de cambio en la cobertura forestal de México de -0.21 % para el periodo comprendido entre 2000 y 2010, esta misma se vio reducida para el periodo 2010-2020, siendo de -0.19 %. Sin embargo, la CONAFOR (2020) entre los años 2007 y 2011 determinó una tasa de cambio de -0.14 % para la cobertura forestal nacional, de la cual las selvas representaron las coberturas más afectadas con una tasa de cambio de -0.30 %. A su vez, un estudio en Campeche realizado entre los años 1976 y 2005, estimó una tasa de deforestación 0.74 % a nivel estatal (Martínez-Romero y Esparza-Olguín, 2010). Mientras que para el municipio de Escárcega el POET (2015) refiere entre los años 1976 y 2003 una tasa de cambio de -0.86 % para la selva en el municipio; así como Ellis *et al.* (2015) menciona una tasa de -0.47 % en un estudio para el periodo 2001-2013 en el mismo municipio, resaltando que Escárcega ocupaba el tercer lugar en deforestación a nivel estatal en dicho estudio. Esto destaca debido a que la tasa de cambio de la cobertura arbórea calculada en el presente estudio es de -1.88 %, siendo más del doble para lo registrado municipal y estatalmente, así como casi diez veces lo registrado en promedio nacionalmente.

En lo que respecta al uso agropecuario, su porcentaje de ocupación en ambos tiempos de estudio se encuentra por debajo de lo que establecía la SDR (2016) en el Programa Sectorial de Desarrollo Rural para el estado de Campeche (31.8 %), aunque demostró un aumento durante el periodo de estudio. En el municipio de Escárcega, para el año 2003 según el POET (2015), el uso agropecuario representaba un 12.48 % de la superficie total, mientras que para el 2020 el presente estudio determinó un 25.50 % de ocupación. Este incremento indica que la superficie dedicada al uso agropecuario en el municipio se ha duplicado en 17 años. Esto se puede explicar debido a que la economía del municipio se centra en el sector primario (PDM Escárcega, 2018), además de la presencia de programas de desarrollo agrícola y subsidios ganaderos durante el periodo de estudio, lo que se manifiesta en el aumento significativo del uso de suelo agropecuario a través de los años. (Roy-Chowdhury, 2006).

Asimismo, de acuerdo con SEMARNAT (2012) la tasa de cambio del uso agropecuario a nivel nacional entre los años 1993 y 2002 esta era de 0.68 %, mientras que para el periodo 2002- 2011 disminuyó a un 0.43 %. Estos resultados contrastan con lo encontrado por el presente estudio para el periodo 2000-2020 en Escárcega, ya que la tasa de cambio anual de dicho uso aumentó más de nueve veces lo registrado nacionalmente para 2002-2011, alcanzado un valor de 3.95 %. No obstante, los resultados

obtenidos en este trabajo se acercan a lo descrito en el Programa Municipal de Desarrollo Urbano (PMDU) de Escárcega (2021), el cual se basa en las series V (2013) y VI (2016) del INEGI, permitiendo calcular una tasa de cambio de 3.80 % para el uso agropecuario.

En cuanto a la vegetación arbustiva es importante señalar su aumento, el cual fue el tercer cambio más grande en el periodo de estudio. Esto se puede explicar debido a que el tipo de agricultura que más se practica en el municipio de Escárcega es agricultura de temporal (POET, 2015), cuya superficie después de 3 a 5 años es abandonada, ocasionando su regeneración y la creación de mosaicos de vegetación secundaria si no se continúa utilizando para la agricultura o la ganadería (Daniels *et al.*, 2007). De acuerdo con Cortina-Villar *et al.* (1998), quienes incluyeron una fracción del municipio de Escárcega en su estudio, casi la mitad (43 %) de la superficie desmontada para su uso en la agricultura, fue abandonada y naturalmente convertida a vegetación secundaria arbustiva. Al respecto, Busch y Geoghegan (2010) igualmente afirman que es frecuente que las áreas dedicadas a la agricultura se conviertan en vegetación secundaria. Esto coincide con los resultados del presente trabajo, ya que se reporta que de forma neta 40 643 ha de vegetación arbórea se convirtieron en vegetación arbustiva, lo que representa un 47.25 % del cambio neto de cobertura arbórea. Esto podría sugerir que después de deforestar para un uso agropecuario del suelo, casi la mitad de este es abandonado por lo que se convierte en vegetación secundaria, y que pudiera ser propiciado por las actividades agrícolas más que por la ganadería. Por otra parte, se tenía registro de la sustitución de vegetación arbustiva por actividades agropecuarias de un 2.07% de su superficie entre los años 1976 y 2003 en el municipio (POET, 2015), mientras que para el presente estudio se encontró que 20 308 ha de vegetación arbustiva fueron convertidas al uso agropecuario, lo que representa un 12.81 % de dicha cobertura para el año 2020, indicando que el uso agropecuario se encuentra ejerciendo presión no sólo en la cobertura arbórea, sino también en la arbustiva.

La tasa de cambio más grande fue la correspondiente a los cuerpos de agua, lo que se podría deber a la temporalidad del estudio, ya que las imágenes utilizadas en el presente trabajo pertenecieron al periodo de secas en el municipio de Escárcega (marzo-abril). Siendo que en dicha época se registran valores de evaporación y temperatura cercanos a los máximos anuales, los cuales se encuentran en incremento anualmente (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2020) por lo que muchos cuerpos de agua se secan o reducen su tamaño.

Los asentamientos humanos representan la cobertura que menores cambios tuvo ( $K'=0.809$ ). Esto podría estar ocasionado por las tasas de crecimiento poblacional de Escárcega, ya que a pesar de ser el cuarto municipio más poblado de Campeche, tiene una de las tasas de crecimiento más bajas del estado, lo que explica su bajo desarrollo en infraestructura urbana (INEGI, 2020).

## 9. CONCLUSIÓN

En un periodo de 20 años el municipio de Escárcega ha experimentado importantes cambios de cobertura y uso suelo. La tasa de transformación de la cobertura arbórea ha sido provocada principalmente por actividades agropecuarias. De igual forma, la superficie convertida de vegetación arbórea a vegetación arbustiva sugiere la regeneración de áreas anteriormente dedicadas al uso agropecuario, sin embargo, la posibilidad de que dichas áreas con cobertura arbustiva vuelvan a ser de uso agropecuario va en aumento. A nivel espacial, las zonas del municipio de Escárcega con menores tasas de cambio se dan en los alrededores de las áreas naturales protegidas.

Dada la relación entre la disminución de cobertura arbórea y arbustiva con el aumento de la superficie dedicada al uso agropecuario, es necesario implementar medidas que regulen dentro de lo posible estos cambios de uso de suelo o incentiven mecanismos de producción más sostenibles. Considerando esto, los resultados obtenidos en el presente trabajo proporcionan una contribución esencial para el estudio en materia del ordenamiento ecológico del municipio de Escárcega, debido a que no existen estudios actuales que ayuden a reforzar dicho instrumento de política ambiental orientado a las necesidades existentes.

## 10. LITERATURA CITADA

- Abraria V (2000) El índice kappa. SEMERGEN 25(5): 247-249.
- Ambrosio G, González-Jiménez J, Arévalo V (2002) Corrección Radiométrica y Geométrica de Imágenes para la Detección de Cambios en una Serie Temporal. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad de Málaga, Málaga, España.
- Benítez JA, Pacheco C, Escalona-Segura G, Pozo-Montuy G, Alexander SM, Sánchez-González MC, Calam-Yam R (2021) Tendencias del impacto de las vías de comunicación sobre la fauna silvestre: conclusiones para las ANP del sureste de México y previsiones ante el Tren Maya. En: Benítez JA y Escalona-Segura G (ed). Impacto de las vías de comunicación sobre la fauna silvestre en áreas protegidas. Estudios de caso para el sureste de México. Campeche, México. pp: 653-705.
- Bogaert J, Ceulemans R, Van Eysenrode DS (2004) Decision Tree Algorithm for Detection of Spatial Processes in Landscape Transformation. Environmental Management 33 (1): 62-73.
- Busch C, Geoghegan J (2010) Labor scarcity as an underlying cause of the increasing prevalence of deforestation due to cattle pasture development in the southern Yucatán region. Regional Environmental Change 10(3): 191-203.
- Chavez PS (1996) Image-Based Atmospheric Corrections—Revisited and Improved. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 62(9): 1025-1036.
- Chuvieco E (2020) Fundamentals of Satellite Remote Sensing: An Environmental Approach. 3rd Ed. CRC Pres. Boca Raton, Estados Unidos de América. 432 pp.
- Chuvieco E (2010) Teledetección Ambiental: La observación de la Tierra desde el Espacio. 4ta Edición. Ariel Ciencia. Barcelona, España. 591 pp.
- CONAGUA (2020) Climatología. Información Estadística Climatológica. Comisión Nacional del Agua. Ciudad de México, México. [www.smn.conagua.gob.mx](http://www.smn.conagua.gob.mx) Fecha de consulta 01 de junio 2022.
- CONAFOR (2014) Diagnóstico del Programa Presupuestario U036 PRONAFOR-Desarrollo Forestal 2014. Comisión Nacional Forestal. México.
- CONAFOR (2020) Estimación de la tasa de deforestación bruta mediante el enfoque de muestreo. Comisión Nacional Forestal. México.
- Congalton RG (1991) A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data. Remote Sensing of Environment 37 (1): 35–46.
- Corona R, Galicia L, Palacio-Prieto JL, Bürgi M, Hersperger A (2016) Local deforestation patterns and driving forces in a tropical dry forest in two municipalities of southern Oaxaca, Mexico (1985-2006). Investigaciones Geográficas 91: 86-104.

- Cortina-Villar S, Macario-Mendoza P, Ogneva-Himmelberger Y (1998) Cambios en el uso del suelo y deforestación en el sur de los estados de Campeche y Quintana Roo, México. *Investigaciones Geográficas* 38: 41-56.
- Daniels AE, Painter K, Southworth J (2007) Milpa imprint on the tropical dry forest landscape in Yucatan, Mexico: Remote sensing & field measurement of edge vegetation. *Agriculture Ecosystems & Environment* 123(4): 293-304.
- Eastman JR (2016) TerrSet®. Geospatial Monitoring and Modeling System. Manual. Clark University.
- Eastman JR (2020) TerrSet (Versión 2020) [Software de computador]. Clark Labs. <https://clarklabs.org/terrset/>
- Ellis EA, Romero-Montero JA, Hernández-Gómez IU (2015) Evaluación y mapeo de los determinantes de la deforestación en la Península Yucatán. Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID). The Nature Conservancy (TNC). Alianza México REDD+. D.F., México.
- Ellis EA, Hernández-Gómez IU, Romero-Montero JA (2017) Los procesos y causas del cambio en la cobertura forestal de la Península Yucatán, México. *Ecosistemas* 26(1): 101-111.
- Escandón-Calderón J, Ordóñez-Díaz JAB, Nieto de Pascual-Pola MCC, Ordóñez-Díaz MJ (2018) Cambio en la cobertura vegetal y uso del suelo del 2000 al 2009 en Morelos, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 9 (46): 28-53.
- Esri (2016) ArcGIS® (Version 10.5) [Software de computador]. Esri. <https://www.esri.com/en-us/arcgis/about-arcgis/overview>
- Exelis Inc. (2015) ENVI® (Versión 5.3) [Software de computador]. L3Harris Geospatial. <https://www.l3harrisgeospatial.com/Software-Technology/ENVI>
- Exelis Visual Information Solutions (2015) ENVI® Help. Colorado, Estados Unidos de América.
- Fagan M y DeFries R (2009) Measurement and Monitoring of the World's Forests. A Review and Summary of Remote Sensing Technical Capability, 2009–2015. Resources for the future. Nueva York, Estados Unidos de América.
- FAO (1996) Forest resources assessment 1990: Survey of tropical forest cover and study of change processes. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma, Italia.
- FAO (2007) Ganadería y Deforestación. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Subdirección de Información Ganadera y De Análisis y Política del Sector Dirección de Producción y Sanidad Animal. Roma, Italia.
- FAO (2020) Global forest resources assessment 2020: Main Report. . Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma, Italia.
- Figuroa F, Sánchez-Cordero V (2008) Effectiveness of natural protected areas to prevent land use and land cover change in Mexico. *Biodiversity and Conservation* 17:3223–3240.

- Foody GM (2002) Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment* 80: 185-201.
- Franco R (2017) Composiciones Landsat. En: Franco R. *Composiciones Landsat en ArcGIS*. Curso ArcGIS. Bogotá, Colombia. pp: 17-24.
- García-Gil G, March-Mifsut I, Castillo-Santiago MA (2001) Transformación de la vegetación por cambio de uso del suelo en la Reserva de la Biosfera Calakmul, Campeche. *Investigaciones Geográficas* 46: 45-57.
- Geist HJ, Lambin EF (2001) What drives tropical deforestation? LUCR Report Series No. 4. LUCR International Project Office. Louvain-la-Neuve, Bélgica. 136 p.
- Geneletti D (2003) Biodiversity Impact Assessment of roads: an approach based on ecosystem rarity. *Environmental Impact Assessment Review* 23: 343 – 365.
- Global Forest Watch (2021) Panel: México: Campeche. <https://www.globalforestwatch.org> Fecha de consulta 07 de junio 2021.
- Gobierno del Estado de Campeche, Pronatura (2012) Sistema Estatal de Áreas Protegidas del Estado de Campeche. Campeche, México.
- Hernández-Pérez E, García-Franco JG, Vázquez G, Castellano-de Rosas E (2022) Cambio de uso de suelo y fragmentación del paisaje en el centro de Veracruz, México (1989 – 2015). *Madera y Bosques* 28(1): 1-22.
- INEGI (1998) Aspectos técnicos de las imágenes Landsat. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. D.F., México. <https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/imgLANDSAT/> Fecha de consulta 06 de noviembre de 2021.
- INEGI (2016) Catálogo de Tipos de Vegetación Natural e Inducida de México con fines estadísticos y geográficos. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. D.F., México. 35 p.
- INEGI (2020) Censo de Población y Vivienda. Presentación de Resultados. Campeche. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Ciudad de México, México. 113 p.
- INEGI (2020) Encuesta Nacional de Ocupación y Empleo (ENOE), población de 15 años y más de edad. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Ciudad de México, México. <https://www.inegi.org.mx/programas/enoe/15ymas/> Fecha de consulta 04 de junio 2022.
- Kardoulas NG, Bird AC, Lawan AI (1996) Geometric Correction of SPOT and Landsat Imagery: A Comparison of Map- and GPS- Derived Control Points. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 62(10): 1173-1177.
- Lillesand TM, Kiefer RW, Chipman JW (2015) *Remote Sensing and Image Interpretation*. 7ma Edición. Wiley. Nueva Jersey, Estados Unidos de América. 770p.
- Martínez-Austria PF, Patiño-Gomez C (2012) Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tecnología y Ciencias del Agua* 3(1) 5-20.

- Martínez-Romero E, Esparza-Olguín LG (2010) Estudio de caso: Deforestación en el estado de Campeche. Causas directas e indirectas de la principal amenaza sobre la biodiversidad. En: Villalobos-Zapata GJ, Mendoza Vega J (Coord.). La Biodiversidad en Campeche: Estudio de Estado. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [CONABIO], Gobierno del Estado de Campeche, Universidad Autónoma de Campeche, El Colegio de la Frontera Sur. México. 730 p.
- Marquina JJ y Mogollón A (2018) Niveles y escalas de levantamiento de información geográfica en sensores remotos. *Revista Geográfica Venezolana* 59(1):42-52.
- Mas JF, Couturier S (2011) Evaluación de Bases de Datos Cartográficas. En: Bautista-Zuñiga F, Palacio-Prieto JL, Delfín-González H (Editores). Técnicas De Muestreo Para Manejadores De Recursos Naturales. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 790 p.
- Mendoza-Ponce A, Corona-Núñez RO, Galicia L, Kraxner F (2019) Identifying hotspots of land use cover change under socioeconomic and climate change scenarios in Mexico. *Ambio* 48: 336-349.
- Monzón-Alvarado C, Arrocha-Morales F, Carrillo-Can LA, Padilla-Paz SE (2016) Programa de Inversión del Estado de Campeche. Alianza México REDD+. México. 154 p.
- Morales- Hernández JC, Carrillo-Gonzales FM, Farfán-Molina LM, Cornejo-López VM (2016) Cambio de cobertura vegetal en la región de Bahía de Banderas, México. *Caldasia* 38 (1): 17–29.
- Moreno-Sánchez R, Moreno-Sánchez F, Torres-Rojo JM (2011) National assessment of the evolution of forest fragmentation in Mexico. *Journal of Forestry Research* 22(2): 167–174.
- Ojima, DS, Galvin KA, Turner BL (1994) The global impact of land-use change. *BioScience* 44: 300-304.
- Plan de desarrollo municipal Escárcega 2018-2021 [PDM] (2018) H. Ayuntamiento de Escárcega 2018-2021. Escárcega, México. 57 p.
- Programa Municipal de Desarrollo Urbano [PMDU] de Escárcega, Campeche (2021) Proyecto “Desarrollo integral territorial y urbano de la región sureste de México – corredor regional Tren Maya”: “Servicios para la elaboración de programas de desarrollo urbano municipal y planes parciales para centros urbanos y alrededores de estaciones de Tren Maya en la región sureste de México”. Fondo Nacional de Fomento al Turismo [FONATUR]. México. 554 p.
- Programa de Ordenamiento Ecológico de Territorio [POET] del Municipio Escárcega, Campeche. Periódico Oficial del Estado. Campeche, México. 30 de enero de 2015.
- Rendón-von Osten J, Villalobos-Zapata GJ (2010) Amenazas a la Biodiversidad. En: Villalobos-Zapata GJ, Mendoza Vega J (Coord.). La Biodiversidad en Campeche: Estudio de Estado. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [CONABIO], Gobierno del Estado de Campeche, Universidad Autónoma de Campeche, El Colegio de la Frontera Sur. México. 730 p.

- Roy-Chowdhury (2006) Landscape change in the Calakmul Biosphere Reserve, Mexico: Modeling the driving forces of smallholder deforestation in land parcels. *Applied Geography* 26 (2): 129-152.
- SDR (2016) Programa Sectorial de Desarrollo Rural. Secretaría de Desarrollo Rural. Campeche, México. 42 p.
- Secretaría de Bienestar (2020) Programa Sembrando Vida. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/bienestar/acciones-y-programas/programa-sembrando-vida> Fecha de consulta 16 de mayo de 2022.
- SEMARNAT (2012) Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales. Indicadores clave y de desempeño ambiental. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. D.F., México.
- SEMARNAT (2016) Informe de de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales. Indicadores clave y de desempeño ambiental y de Crecimiento Verde. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Ciudad de México, México.
- SEMARNAT y CONAFOR (2014) Inventario Estatal Forestal y de Suelos Campeche. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Comisión Nacional Forestal. D.F., México.
- Sherman G (2020) QGIS® (Versión 3.22) [Software de computador]. Open Source Geospatial Foundation. <https://www.qgis.org/es/site/>
- Spectral Sciences Inc. (2016) About MODTRAN. United States Air Force. [http://modtran.spectral.com/modtran\\_about](http://modtran.spectral.com/modtran_about) Fecha de consulta 01 de marzo de 2022.
- USGS (2018) USGS EROS Archive - Landsat Archives - Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) Level-1 Data Products. Servicio Geológico de los Estados Unidos. [https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-landsat-archives-landsat-7-enhanced-thematic-mapper-plus-etm?qt-science\\_center\\_objects=0#qt-science\\_center\\_objects](https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-landsat-archives-landsat-7-enhanced-thematic-mapper-plus-etm?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects) Fecha de consulta 04 de noviembre de 2021.
- USGS (2019) USGS EROS Archive - Landsat Archives - Landsat 8 OLI (Operational Land Imager) and TIRS (Thermal Infrared Sensor) Level-1 Data Products. Servicio Geológico de los Estados Unidos. [https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-landsat-archives-landsat-8-oli-operational-land-imager-and?qt-science\\_center\\_objects=0#qt-science\\_center\\_objects](https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-landsat-archives-landsat-8-oli-operational-land-imager-and?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects) Fecha de consulta 04 de noviembre de 2021.
- Vargas-Villamizar TC y Rosales-Salas CA (2014) Pérdida de la cobertura vegetal y sus repercusiones ambientales y legales. *Geoenseñanza* 19(1): 61-79.
- Velázquez A, Duran E, Larrazábal A, López F, Medina C (2010) La cobertura vegetal y los cambios de uso del suelo. Atlas fisicogeográfico de la cuenca del Tepalcatepec. pp. 28-32.
- Vester HFM, Lawrence D, Eastman JR, Turner II BL, Calme S, Dickson R, Pozo C, Sangermano F (2007) Land change in the southern Yucatan and Calakmul biosphere reserve: effects on habitat and biodiversity. *Ecological Applications* 17: 989–1003.

Warman J, Zuñiga JI, Cervera M (2021) Análisis de los impactos en las coberturas forestales y potencial de mitigación de las parcelas del programa Sembrando Vida implementadas en 2019. Instituto de Recursos Mundiales [WRI]. México.

Warner TA, Campagna DJ, Sangermano F (2021) Remote Sensing with TerrSet 2020/IDRISI. A Beginner's Guide. Hong Kong. 390 p.