



DOI: [10.29298/rmcf.v15i81.1425](https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i81.1425)

Artículo de investigación

## **Análisis multitemporal de cambios en el *NDVI* en una región con aprovechamiento forestal en la península de Yucatán, México**

### **Multitemporal analysis of changes in *NDVI* in a region with forest harvesting**

Alejandro Antonio Vela-Pelaez<sup>1</sup>, María Angélica Navarro-Martínez<sup>2\*</sup>, Martín Alfonso Mendoza Briseño<sup>3</sup>, Joan Alberto Sánchez-Sánchez<sup>4</sup>, Ligia Guadalupe Esparza-Olguín<sup>5</sup>

Fecha de recepción/Reception date: 28 de agosto de 2023.

Fecha de aceptación/Acceptance date: 13 de diciembre de 2023.

<sup>1</sup>Colegio de la Frontera Sur. Doctorado en Ecología y Desarrollo Sustentable. México.

<sup>2</sup>Colegio de la Frontera Sur. Analítica Espacial y Ciencia de Datos. México.

<sup>3</sup>Colegio de Postgraduados, Campus Veracruz. México.

<sup>4</sup>Colegio de la Frontera Sur. Biotecnología Ambiental. México.

<sup>5</sup>Colegio de la Frontera Sur. Adaptación humana y manejo de recursos en ecosistemas tropicales. México.

\*Autor para correspondencia; correo-e: [manava@ecosur.mx](mailto:manava@ecosur.mx)

\*Corresponding author; e-mail: [manava@ecosur.mx](mailto:manava@ecosur.mx)

#### **Resumen**

Las selvas de la Península de Yucatán han estado sujetas periódicamente a diferentes factores de perturbación natural y antropogénica, entre ellos la ocurrencia de huracanes y el aprovechamiento maderable, este último con una historia de más de 300 años. El uso de sensores remotos se ha empleado ampliamente para la gestión de coberturas forestales y otros usos del suelo. La información satelital permite el cálculo de diversos índices útiles para la administración forestal, uno de los más usados es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (*NDVI*) que se asocia a la fracción de la radiación solar absorbida por las plantas. El objetivo del presente estudio fue analizar la dinámica espacio-temporal de los cambios en el *NDVI* en una región con aprovechamiento maderable en el estado de Quintana Roo y determinar sus posibles causas durante el periodo 1985-2022. Se generó una serie de tiempo de valores de *NDVI* en imágenes de los sensores *Landsat* para los años 1985, 1993, 2000, 2010 y 2022. Las diferencias en los valores del *NDVI* fueron amplias y parecen seguir la recurrencia de huracanes en la región. La tala forestal no explicó los patrones al alza y a la baja en los valores del *NDVI*, ni coincidieron con las modificaciones en la vegetación, ya que no cambian las características de la cobertura del suelo. Estos resultados proporcionan evidencia parcial de que cambios significativos en las características de la vegetación solo ocurren después de perturbaciones importantes y extensas como los huracanes.

**Palabras clave:** Aprovechamiento forestal maderable, huracanes, imágenes satelitales, Península de Yucatán, perturbaciones, teledetección.

#### **Abstract**

The forests of the *Yucatán* Peninsula have been periodically subjected to various natural and anthropogenic disturbance factors, among these are the occurrence of hurricanes and logging, the latter with a history of more than 300 years. The use of remote sensing has been widely employed for forest cover management and other land uses. Satellite information allows the calculation of several indexes that are useful for purposes of forest management, one of the most widely used is the Normalized Difference Vegetation Index (*NDVI*), which is associated with the fraction of solar radiation absorbed by plants. The objective of this study was to analyze the spatial-temporal dynamics of the *NDVI* changes in a region under forest harvesting in the state of *Quintana Roo* and determine their possible causes during the 1985-2022 period. A time series of *NDVI* values was generated from Landsat sensor images for the years 1985, 1993, 2000, 2010 and 2022. Differences in *NDVI* values were wide and appear to follow the recurrence of hurricanes in the region. Logging did not explain the upward and downward patterns in *NDVI* values, nor did these patterns coincide with the changes in vegetation, as they do not change the land cover characteristics. These results provide partial evidence that significant changes in vegetation characteristics occur only after major and extensive disturbances such as hurricanes.

**Key words:** Logging, hurricanes, satellite images, *Yucatán* Peninsula, disturbances, remote sensing.

## Introducción

Después del Amazonas, la Selva Maya de la Península de Yucatán forma parte del segundo macizo más grande de bosque tropical en América. Se extiende por el sur de México, Belice y el norte de Guatemala, y constituye una región biogeográfica única que ocupa una superficie de más de 14 millones de hectáreas (Rodstrom *et al.*, 1999). Históricamente, ha estado sujeta al aprovechamiento forestal maderable y ha sido el sustento de los pobladores mayas por más de 300 años (Navarro-Martínez, 2011).

En la actualidad, la extracción selectiva de recursos forestales de la selva en la región forma una parte importante en la economía y subsistencia de la población rural de alrededor de 150 ejidos ubicados en los estados de Campeche, Quintana Roo y Yucatán (información proporcionada por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). Además, frecuentemente están sujetas a la ocurrencia de fenómenos meteorológicos como huracanes, tormentas y depresiones tropicales con diferente magnitud y grado de afectación, así como a incendios forestales por la acumulación de materiales combustibles después de los vientos huracanados y

las lluvias (Vester y Navarro, 2007). Dichos fenómenos impactan a la vegetación y al arbolado, ocasionando daños como descopado, defoliación, desenraizado y quebrado (Navarro y Granados, 1997; Navarro-Martínez *et al.*, 2012), lo que genera cambios en la cobertura forestal.

Por su importancia económica y ecológica para la conservación de la región, en los últimos años se ha incrementado sustancialmente el interés por estudiar la dinámica de cambios en la cobertura forestal por efecto de factores humanos de perturbación en la Selva Maya (Dupuy *et al.*, 2012; Hernández-Gómez *et al.*, 2019, 2020), por deforestación (Ellis *et al.*, 2017; Huchin *et al.*, 2022) y degradación (Ellis *et al.*, 2020, 2021), asimismo se han abordado aspectos como la estimación y dinámica de cambio en la biomasa y carbono forestal (Dai *et al.*, 2014; Hernández-Stefanoni *et al.*, 2018, 2020, 2021; Hernández y Ellis, 2023), entre otros. Pero las investigaciones sobre la salud de la vegetación (Huechacona-Ruiz *et al.*, 2020) han sido poco consideradas.

Para evaluar la salud del bosque se han propuesto diversas metodologías, entre las más usadas están la estimación de índices de vegetación mediante técnicas de teledetección (Gilabert *et al.*, 1997). La teledetección es una herramienta clave en el manejo forestal, ya que proporciona información valiosa sobre la cobertura forestal, estructura y sus cambios en el tiempo (Moizo, 2004; Torres-Rojas *et al.*, 2016).

## **Evaluación de la calidad y vigor de la vegetación**

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (*NDVI*) es uno de los índices más usados para medir la cantidad y la salud de la vegetación forestal en un área

determinada (Manrique, 1999; Vázquez *et al.*, 2013), también permite monitorear cambios estacionales e interanuales tanto en la actividad fotosintética como en el crecimiento de la vegetación. El *NDVI* resulta del cociente normalizado entre bandas espectrales que, al mostrar un claro contraste entre las visibles (0.6 a 0.7  $\mu\text{m}$ ) y el infrarrojo cercano (0.7 a 1.1  $\mu\text{m}$ ), hacen posible identificar la vegetación de ciertas superficies (Chuvienco, 2010). Dicho índice se correlaciona con el contenido de clorofila en el follaje, la radiación fotosintéticamente activa, la productividad neta de la vegetación y el Índice de Área Foliar, entre otros (Chuvienco, 2010).

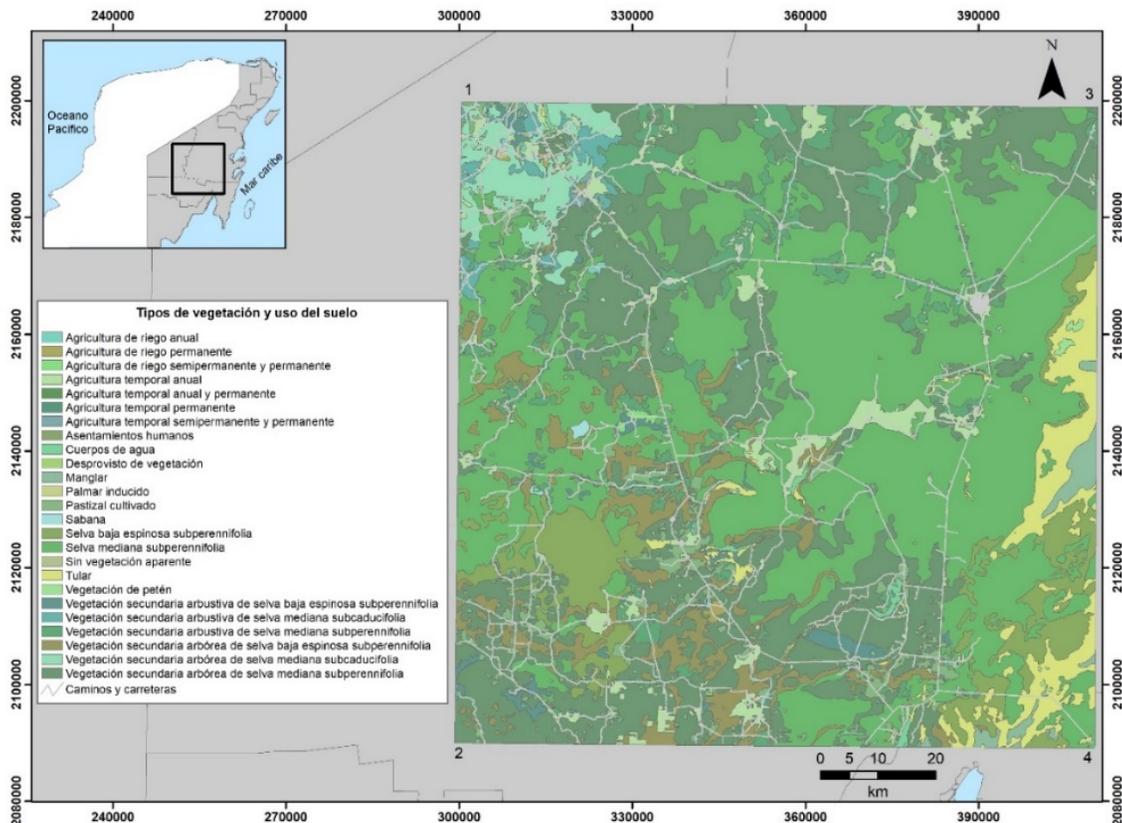
El *NDVI* tiene aplicaciones múltiples, sobre todo si se tienen observaciones en distintas fechas (series de tiempo). Mediante el análisis de estas series se facilita el monitoreo de la vegetación y la detección de cambios en la cobertura y uso del suelo (Vázquez *et al.*, 2013; Hernández-Ramos *et al.*, 2020), la caracterización de la fenología de la vegetación y el seguimiento de fenómenos como la sequía (Manrique, 1999), además es factible estudiar la sucesión ecológica en áreas perturbadas (Ruiz *et al.*, 2017; Díaz *et al.*, 2021). El *NDVI* es un indicador numérico que cuantifica la diferencia espectral entre los intervalos rojo e infrarrojo cercano del espectro electromagnético, es decir, en una escala de -1 a 1, con valores cercanos a 1 que indican vegetación densa y saludable, y valores cercanos a -1 que sugieren la presencia de zonas áridas carentes de vegetación o baja actividad fotosintética (Alcaraz-Segura *et al.*, 2008; Millano-Tudare *et al.*, 2017).

El presente estudio tuvo la finalidad de analizar la dinámica espacio-temporal de los cambios en el *NDVI* en una región con aprovechamiento forestal maderable en el estado de Quintana Roo y determinar sus posibles causas durante el periodo 1985-2022.

## **Materiales y Métodos**

## Zona de estudio

El área de estudio cubrió una superficie de 1 200 000 ha y se localiza en la zona central de Quintana Roo, en los municipios Felipe Carrillo Puerto, Bacalar, José María Morelos y Othón P. Blanco. Geográficamente se ubica en las coordenadas UTM zona 16: 341172.21 E y 2176773.48 N (punto 1), 341124.94 E y 2130846.12 N (punto 2), 386219.6 E y 2177180.19 N (punto 3), y 385929.44 E y 2131213.15 N (punto 4) (Conabio, 2023) (Figura 1).



La numeración corresponde a cada punto en la esquina del área de estudio.

Elaboración propia a partir de Conabio (2023).

**Figura 1.** Ubicación del área de estudio.

El principal tipo de vegetación es la selva mediana subperennifolia que forma una gran matriz en la que se intercalan manchones de selva baja inundable, sabanas y zonas agrícolas (Conabio, 2023), los cuales se desarrollan sobre suelos de tipo litosol, vertisol y gleysol (Bautista *et al.*, 2011). En la región, la precipitación y la temperatura promedio anuales son 1 290 mm y 26 °C, respectivamente (García, 2004).

La agricultura de roza-tumba-quema y el aprovechamiento de productos forestales (madera para aserrío, palizada y carbón) de manera comercial tienen un lugar importante en la economía local (Tobasura, 2017). Actualmente, en la zona de estudio se aprovechan 23 especies arbóreas, pero la más extraída es la caoba (*Swietenia macrophylla* King). Además, se cosechan otros productos forestales maderables como la palizada, el carbón y la leña (Navarro *et al.*, 2000).

## **Obtención y procesamiento de las imágenes satelitales**

Para calcular el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (*NDVI*) se utilizaron dos imágenes espectrales de los sensores de los satélites *Landsat 5*, *7* y *8* para cada año de estudio, con un total de diez imágenes (Cuadro 1). Se seleccionó dicha área para el estudio porque en ella se encuentran ejidos forestales que iniciarán una nueva forma de manejo forestal cuyos criterios están fuertemente basados en la ecología y la dinámica de la selva, incluidos los regímenes naturales de perturbación

natural. Cabe mencionar que todas las imágenes se obtuvieron para la época de secas.

**Cuadro 1.** Principales características de las imágenes satelitales empleadas para el análisis del *NDVI*.

Fecha	Sensor	Path*	Row*	Fecha	Sensor	Path*	Row*
14/01/1985	Landsat 5	19	46	09/02/2000	Landsat 5	19	47
14/01/1985	Landsat 5	19	47	28/02/2010	Landsat 7	19	46
21/02/1993	Landsat 5	19	46	28/02/2010	Landsat 7	19	47
21/02/1993	Landsat 5	19	47	25/03/2022	Landsat 8	19	46
09/02/2000	Landsat 5	19	46	25/03/2022	Landsat 8	19	47

\* Número de fila y columna dentro del catálogo de escenas del Sistema de Referencia Mundial (*Worldwide Reference System* en inglés) de *Landsat* que permite identificar el fragmento de imagen, respectivamente.

Las imágenes se descargaron de la plataforma *The Copernicus Open Access Hub* (<https://scihub.copernicus.eu/>) con una resolución de 30×30 m (900 m<sup>2</sup>) por pixel, una nubosidad menor a 5 % y con las correcciones radiométricas y atmosféricas; se usaron las bandas de espectro visible e infrarrojo cercano (Vega *et al.*, 2008).

El análisis de las imágenes se hizo con el *software ArcGIS™* v.10.4 (ESRI, 2015) mediante distintas escalas establecidas de acuerdo con la resolución de las imágenes ópticas del sensor *Landsat* para la elaboración de la cartografía requerida (Lemma *et al.*, 2021).

## Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (*NDVI*)

Para la estimación del *NDVI* se utilizaron las bandas espectrales infrarrojo cercano y rojo visible de los sensores de los satélites *Landsat* antes indicadas, para ello se usó la siguiente ecuación (Tecuapetla-Gómez *et al.*, 2022):

$$NDVI = \frac{(NIR-RED)}{(NIR+RED)} \quad (1)$$

Donde:

*NDVI* = Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

*NIR* = Infrarrojo cercano

*RED* = Rojo visible

Los análisis se realizaron con base en las diez imágenes señaladas en el Cuadro 1, que incluyen el área de estudio. Estas se unieron por pares y fecha para cubrir toda la superficie del área de estudio y generar los *NDVI* para los años 1985, 1993, 2000, 2010 y 2022, debido a la mayor ocurrencia de huracanes y fenómenos similares en la zona. Los *NDVI* se estandarizaron considerando 11 clases para tener una mejor claridad de los cambios del índice. La clasificación se obtuvo dividiendo el valor total del *NDVI* en valores que aumentan cada 0.05.

Para obtener una tendencia en los valores del *NDVI* por periodo de tiempo, se dividió el área en parcelas de una hectárea, es decir 1 200 000 parcelas. Se consideró como el tamaño total de la muestra la superficie del área de estudio, y se eligieron 385 parcelas al azar de las que se estimaron los valores del *NDVI*. El tamaño de muestra se definió buscando una confiabilidad de 95 %, con base en la fórmula siguiente (Daniel, 1991):

$$\text{Tamaño de muestra} = \frac{\frac{z^2 K p(1-p)}{e^2}}{1 + \left(\frac{z^2 K p(1-p)}{e^2 N}\right)} \quad (2)$$

Donde:

$z$  = Puntuación

$p$  = 0.5

$e$  = Margen de error

## **Análisis de las causas de los cambios en el *NDVI***

Se realizó una revisión bibliográfica para determinar las posibles causas de las modificaciones en el *NDVI*, entre ellas las derivadas de fenómenos naturales y actividades antropogénicas como el aprovechamiento forestal, la ocurrencia de huracanes, sequías e incendios tanto en la zona de estudio como en la Península de Yucatán (Hammond, 1982; Suárez *et al.*, 1994; Boose *et al.*, 2003; Snook, 2005; Vester y Navarro, 2007; Navarro-Martínez, 2011; Navarro-Martínez *et al.*, 2012; Márdero *et al.*, 2012; Estrada-Medina *et al.*, 2016; Rivera-Monroy *et al.*, 2020; Sánchez-Rivera y Gómez-Mendoza, 2022). Asimismo, se revisaron los documentos técnicos unificados (DTU) de los ejidos Chan Santa Cruz y Betania, municipio Felipe Carrillo Puerto, además de tener un estudio previo sobre la clasificación de la cobertura de uso de suelo en el área de estudio.

De todos los factores considerados, solo los huracanes mostraron incidencia sobre la pérdida de cobertura vegetal a mayor escala de análisis captada en su reflectancia, por lo tanto, en el *NDVI*.

El análisis de los huracanes consistió en elaborar su mapa de trayectorias. Para ello, se descargaron sus rutas de la página oficial de la NOAA (<https://www.ncei.noaa.gov/data/international-best-track-archive-for-climate-stewardship-ibtracs/v04r00/access/shapefile/>), así como un archivo con extensión (*.shp*) que muestra todas las trayectorias de los huracanes ocurridos en la región desde 1972 hasta la actualidad. Se ejecutó un corte de estas para obtener solo la zona de estudio. Posteriormente, se procedió a calcular los radios de los segmentos de las trayectorias de los huracanes mediante la fórmula publicada en la guía básica para la elaboración de atlas estatales de peligros y riesgos (SSPC-Cenapred, 2021). Para estimar el valor *R* del radio de máximo viento (en km), se empleó la siguiente ecuación (SSPC-Cenapred, 2021):

$$R = 0.0007e^{0.01156p_0} \quad (3)$$

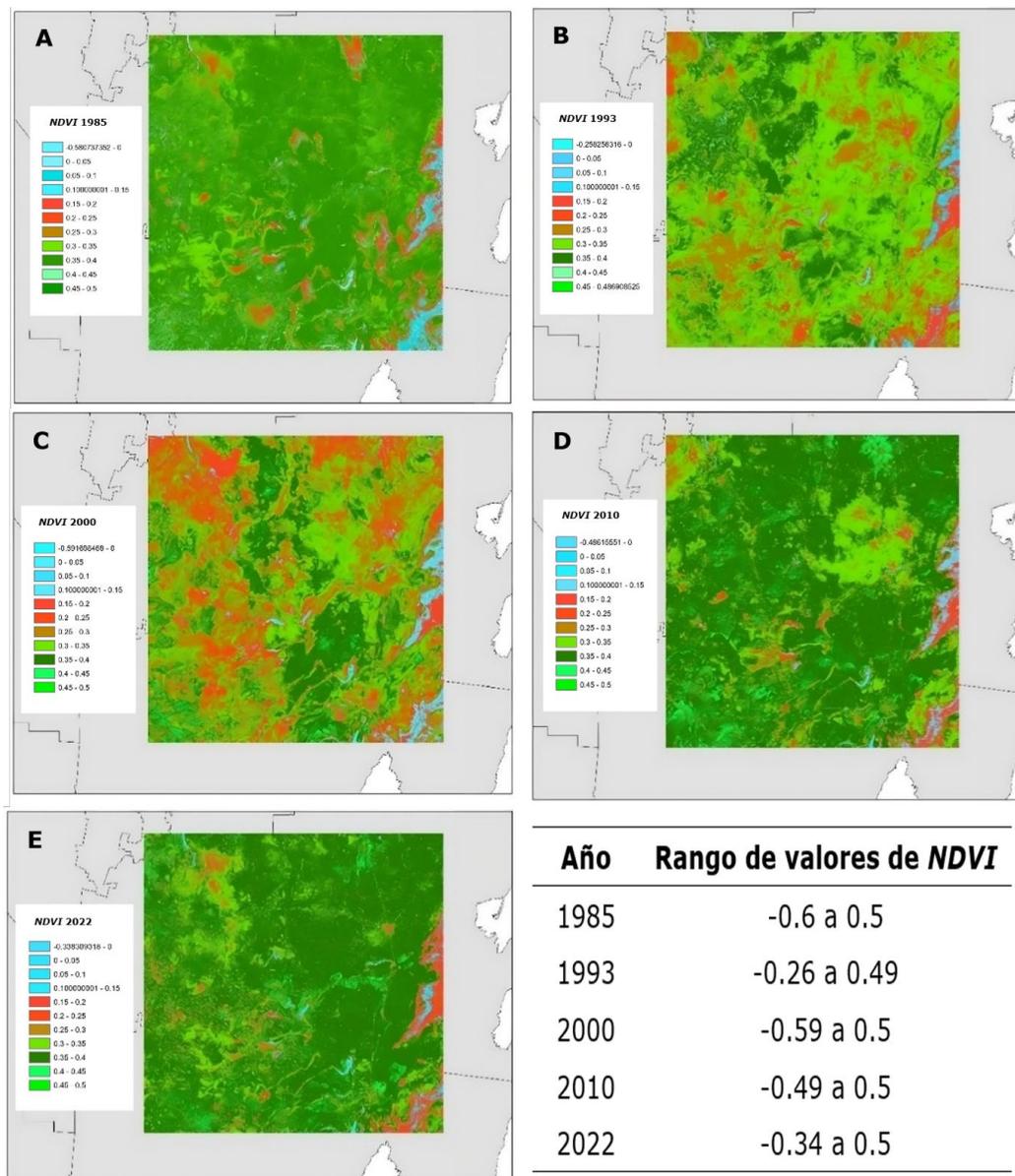
Donde:

$p_0$  = Presión central

$e$  = Base del logaritmo natural ( $e=2.71828$ )

## Resultados

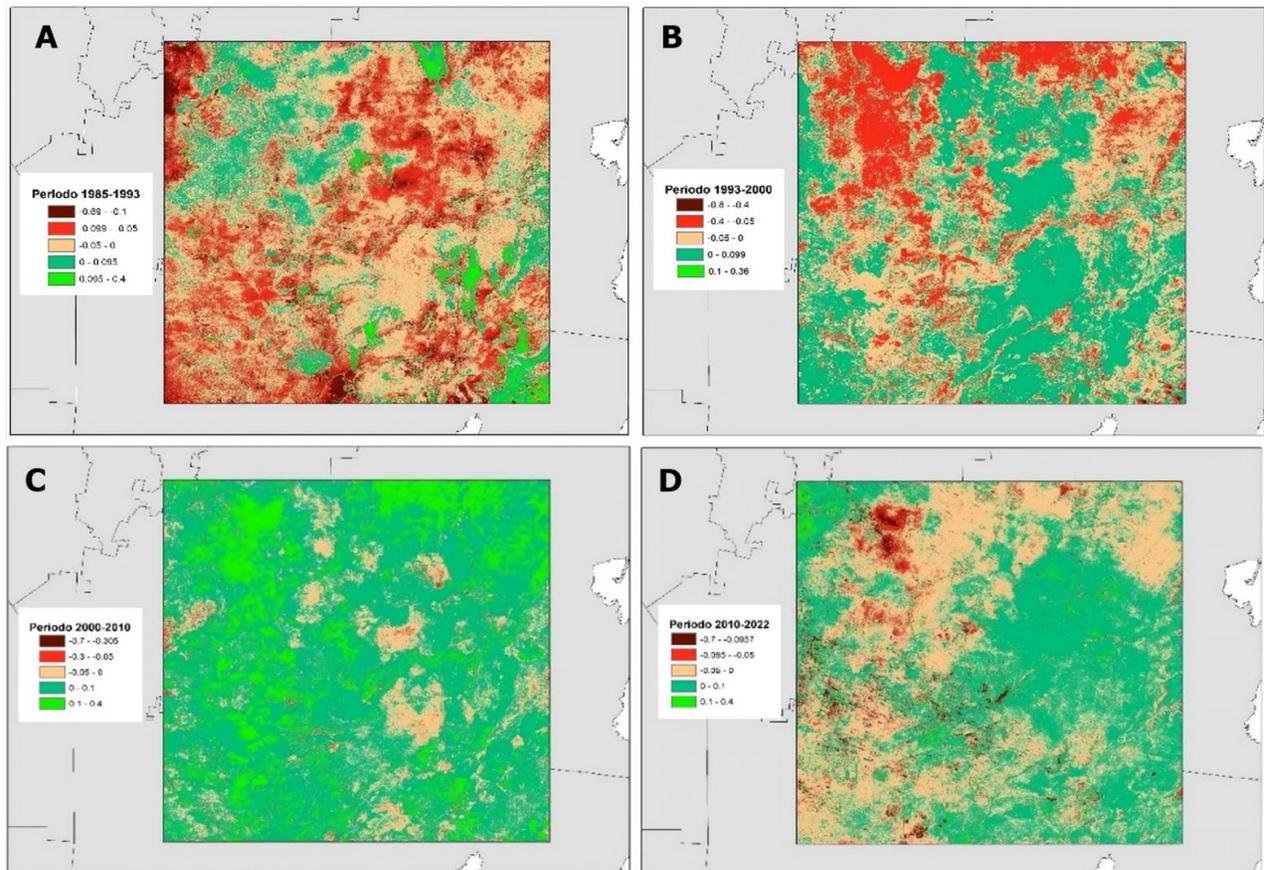
Los valores del *NDVI* variaron entre -0.59 y 0.5 de acuerdo con la categoría y el año de evaluación (Figura 2), así para 1985, 1993, 2000, 2010 y 2022, el valor más bajo (primera categoría) fue -0.58, -0.26, -0.59, -0.49 y -0.34, respectivamente. Los valores negativos representan escasa vegetación o vegetación menos vigorosa que aquellos sitios con valores positivos de *NDVI*: entre más cercanos a 1, la condición de la vegetación es más saludable.



A = 1985; B = 1993; C = 2000; D = 2010; E =2022.

**Figura 2.** Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada por año para 1 200 000 ha en la Selva Maya de Quintana Roo.

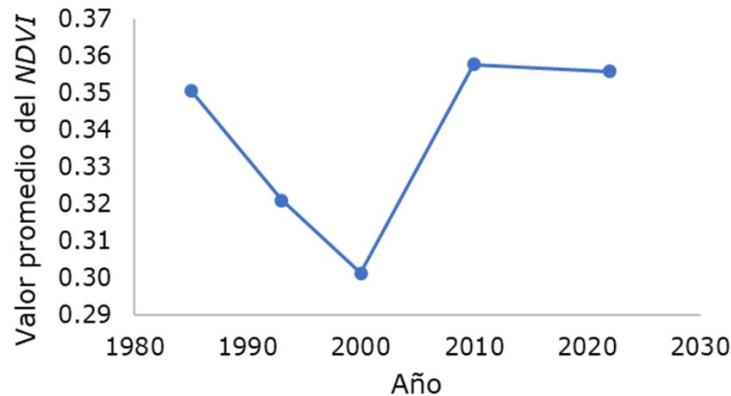
Para todos los años, el valor más alto fue de 0.5. Esto indica una diferencia significativa en el cambio de dichos valores, particularmente en los años de 1985 a 1993 (Figura 3A) y de 1993 a 2000 (Figura 3B). Esos datos se corroboran al hacer el análisis por periodos, en el cual se observó que para 1985 y 1993 hubo una disminución de 79.1 %, y de 1993 a 2000, los valores en el *NDVI* disminuyeron en 57.1 %, mientras que en el periodo de 2000 a 2010, los *NDVI* aumentaron en 83.7 %, lo que sugiere una recuperación de la vegetación y una mejor calidad de esta (Cuadro 2, Figura 4).



**Figura 3.** Promedio de *NDVI* por periodo y fecha de ocurrencia de fenómenos ciclónicos en la Selva Maya de Quintana Roo.

**Cuadro 2.** Cambio en la cobertura forestal perdida y recuperada por periodo en el área de estudio en hectáreas y porcentaje.

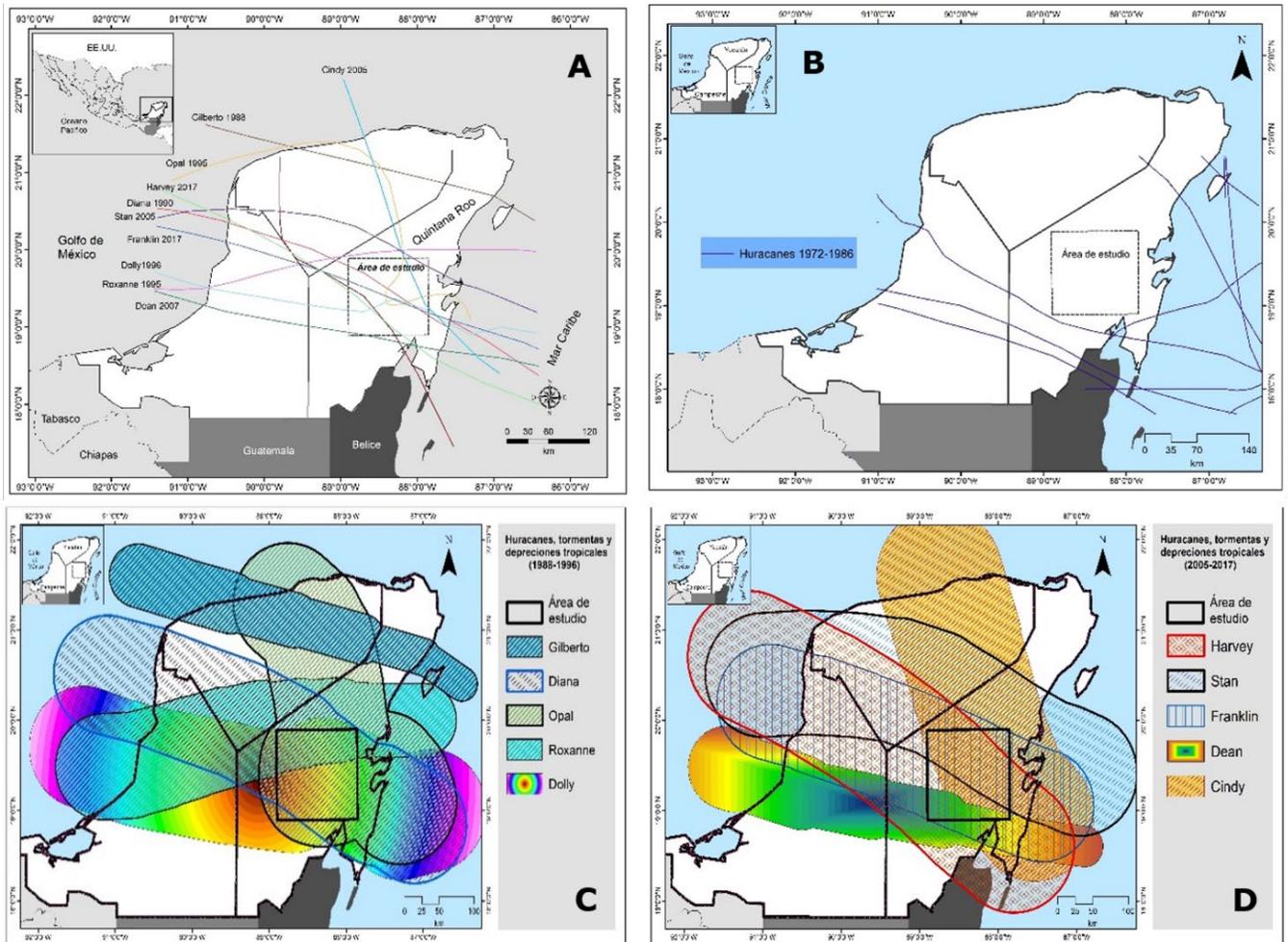
Periodo	Superficie pérdida (ha)	%	Superficie recuperada (ha)	%
1985-1993	960 468	79.1	253 045	20.9
1993-2000	693 509	57.1	520 005	42.9
2000-2010	197 882	16.3	1 015 632	83.7
2010-2022	619 896	51.1	593 617	48.9



**Figura 4.** Cambios anuales en los valores promedio del *NDVI* para la zona central de la Selva Maya quintanarroense de 1985 a 2020.

Con relación a la ocurrencia de fenómenos ciclónicos en el área de estudio, durante 1988 y 2017 tocaron tierra quintanarroense, particularmente en la zona centro-sur, un total de diez eventos (Figura 5A): cinco huracanes, dos de Categoría 3 (*Roxanne* y *Dean*), dos de Categoría 1 y Gilberto de Categoría 5, además de dos tormentas y tres depresiones tropicales (Cuadro 3). Previo a esos fenómenos meteorológicos, durante 1972 y 1986 ocurrieron siete eventos tropicales (Figura 5B). Como puede

observarse en las figuras 5C y 5D, todos estos eventos cubrieron un área de impacto muy amplia que comprende el área de estudio, por lo que es razonable pensar que tales fenómenos pueden ser la causa de las grandes diferencias en los valores del *NDVI* por defoliación, quebrado y derribo de árboles grandes.



A = 1988-2017; B = 1972-1986; C = Área de afectación entre 1988 y 1996; D = Periodo 2005-2017.

**Figura 5.** Trayectoria y amplitud de fenómenos meteorológicos en la zona de estudio.

**Cuadro 3.** Ocurrencia de fenómenos ciclónicos en el área de estudio durante el periodo 1988-2017.

<b>Nombre</b>	<b>Año</b>	<b>Intensidad</b>	<b>Km h<sup>-1</sup></b>
Gilberto	1988	H5	259
Diana	1990	H1	140
Ópalo	1995	DT	55
<i>Roxanne</i>	1995	H3	185
<i>Dolly</i>	1996	H1	120
<i>Cindy</i>	2005	DT	55
<i>Stan</i>	2005	TT	74
<i>Dean</i>	2007	H3	203
<i>Harvey</i>	2017	DT	46
<i>Franklin</i>	2017	TT	95

H = Categoría del Huracán; TT = Tormenta tropical; DT = Depresión tropical.

Cabe mencionar que, como es bien sabido, los efectos de tales fenómenos sobre la dinámica de pérdida y recuperación de la cobertura forestal son inmediatos, a largo plazo y a una escala espacial amplia; el análisis consideró todo el periodo de estudio.

## **Discusión**

### **Cambios en los valores del *NDVI***

Los valores del *NDVI* de 1993 disminuyeron en 960 468 ha, correspondiente a 79.1 % de la superficie total bajo estudio, con respecto a los valores de 1985, y para 1993, 693 509 ha, que representaron 57.1 % en relación al 2000. Los *NDVI* del 2000 redujeron sus valores en 197 882 ha (6.3 %) para 2010, pero hubo un aumento en 1 015 632 ha, es decir, 83.7 %, lo que constituyó una importante recuperación de la cobertura forestal. Finalmente, de 2010 a 2022, el *NDVI* disminuyó 619 896 ha (51.1 %) y continuó la revegetación con un aumento en 593 617 ha (48.9 %) con relación a la superficie total del área de estudio. Estos cambios en los valores del *NDVI* coinciden con los hallazgos de Sánchez-Rivera y Gómez-Mendoza (2022), quienes registraron para el periodo de 2000 a 2010 que 67 % de los ciclones tropicales ocurridos en la Península de Yucatán, impactaron de manera negativa la vegetación de la región y ocasionaron una disminución en los valores del *NDVI*.

El *NDVI* disminuyó en el área de estudio entre 57 y 79 % de las 1 200 000 ha totales en los periodos antes mencionados. Los valores negativos corresponden a cuerpos de agua naturales o zonas encharcadas, mientras que valores positivos cercanos a cero identifican áreas con escasa vegetación, y a medida que el índice alcanza valores positivos más cercanos a 0.5, corresponden a vegetación selvática y densa (Inegi, 2022).

## **Análisis de las posibles causas de cambios en el *NDVI***

Con relación a las posibles causas de los cambios en el *NDVI* en el área y el periodo de estudio (1993-2022), diversos estudios han mostrado que la selva en los ejidos con aprovechamiento forestal maderable es la más conservada del estado de

Quintana Roo (Navarro-Martínez, 2011; Navarro, 2015; Rivera-Monroy *et al.*, 2020). No obstante que durante más de tres siglos se ha extraído madera, la intensidad de corta es tan baja (1-2 %) (Flachsenberg y Galletti, 1999), que el impacto sobre la cobertura forestal es prácticamente imperceptible y la recuperación del dosel es muy rápida, así que este aspecto no tiene ninguna influencia sobre los valores del *NDVI*. De hecho, Bray *et al.* (2004) y Durán-Medina *et al.* (2007) sugieren que una de las causas del mantenimiento de la cobertura forestal en la zona maya quintanarroense es la silvicultura comunitaria que se practica desde los inicios de 1980.

Con relación a los fenómenos meteorológicos, se ha documentado en la región su efecto sobre la selva dada su intensidad y área de influencia. Los resultados que aquí se presentan coinciden con los hallazgos de algunos autores, quienes concluyen que el impacto y amplitud de los huracanes, generalmente, se incrementa por la ocurrencia posterior de incendios forestales, como sucedió en los casos de Gilberto, Ópalo, Roxanne y Dean (Navarro y Granados, 1997; Navarro-Martínez *et al.*, 2012). Para la Península de Yucatán, Snook (1993) y Vester y Navarro (2007) concluyen que los huracanes crean condiciones favorables para la regeneración de la selva, ya que las hacen altamente resilientes tanto a su presencia como al fuego. Además, dichos factores determinan la dinámica de estos ecosistemas (Vester y Navarro, 2007).

En el área de estudio, el *NDVI* pudo ser afectado por los impactos sobre el arbolado y la vegetación con la pérdida de cobertura vegetal debido al derribo, descopado, defoliación y muerte del arbolado dañado por esos fenómenos meteorológicos, ya que este índice se relaciona con el contenido de clorofila en el follaje y la radiación fotosintéticamente activa (Pettorelli *et al.*, 2005; Chuvieco, 2010). Estos fenómenos pueden defoliar las copas de los árboles hasta en 100 % (Navarro-Martínez *et al.*, 2012; Pat-Aké *et al.*, 2018), lo cual afecta de manera negativa los valores del *NDVI* y los hace muy bajos (Parenti, 2015).

## **Conclusiones**

Las diferencias en los valores del *NDVI* fueron amplias y parecen seguir la recurrencia de huracanes en la región. La tala forestal no explica los patrones al alza ni a la baja en los valores del *NDVI*, tampoco coinciden con los cambios en la vegetación, ya que no cambian las características de la cobertura del suelo. Estos resultados proporcionan evidencia parcial de que cambios significativos en las características de la vegetación solo pueden ocurrir después de perturbaciones importantes y extensas como los huracanes.

## **Agradecimientos**

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología por la beca otorgada para la realización de la investigación doctoral del primer autor.

## **Conflicto de interés**

Los autores manifiestan no presentar ningún conflicto de interés ni relación alguna con las instituciones que apoyaron la investigación.

## **Contribuciones por autor**

Alejandro Antonio Vela-Pelaez: generó la idea, realizó los análisis de la información, preparó las figuras y cuadros del manuscrito, escribió la primera versión del manuscrito; María Angélica Navarro-Martínez: contribuyó en la conceptualización, revisión del manuscrito y redacción de la versión final; Martín Alfonso Mendoza Briseño: contribuyó en la conceptualización, discusión y redacción de las varias versiones del documento; Joan Alberto Sánchez-Sánchez: contribuyó en la preparación de las figuras y análisis de la información; Ligia Guadalupe Esparza-Olguín: participó en la conceptualización, la discusión de las ideas y la revisión del documento en general.

## Referencias

- Alcaraz-Segura, D., G. Baldi, P. Durante y M. F. Garbulsky. 2008. Análisis de la dinámica temporal del NDVI en áreas protegidas: tres casos de estudio a distintas escalas espaciales, temporales y de gestión. *Ecosistemas* 17(3):108-117. <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/82>. (20 de mayo de 2023).
- Bautista, F., G. Palacio-Aponte, P. Quintana and J. A. Zinck. 2011. Spatial distribution and development of soils in tropical karst areas from the Peninsula of Yucatan, Mexico. *Geomorphology* 135(3-4):308-321. Doi: 10.1016/j.geomorph.2011.02.014.
- Boose, E. R., D. R. Foster, A. B. Plotkin and B. Hall. 2003. Geographical and historical variation in hurricanes across the Yucatán Peninsula. In: Gómez-Pompa, A., M. F. Allen, S. L. Fedick and J. J. Jiménez-Osornio (Edits.). *The lowland Maya area: Three millennia at the human-wildland interface*. Food Products Press. Binghamton, NY, United States of America. pp. 495-516.
- Bray, D. B., E. A. Ellis, N. Armijo-Canto and C. T. Beck. 2004. The institutional drivers of sustainable landscapes: a case study of the "Mayan Zone" in Quintana

- Roo, Mexico. Land Use Policy 21(4):333-346. Doi: 10.1016/j.landusepol.2003.11.001.
- Chuvienco S., E. 2010. Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el espacio. Ariel. Barcelona, CT, España. 590 p.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio). 2023. Mapa de uso de suelo y vegetación Serie VII. Portal de Geoinformación 2023. Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (SNIB). <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>. (7 de enero de 2024).
- Dai, Z., R. A. Birdsey, K. D. Johnson, J. M. Dupuy, J. L. Hernandez-Stefanoni and K. Richardson. 2014. Modeling carbon stocks in a secondary tropical dry forest in the Yucatan Peninsula, Mexico. *Water, Air, & Soil Pollution* 225:1-15. Doi: 10.1007/s11270-014-1925-x.
- Daniel, W. W. 1991. Bioestadística. Base para el análisis de las ciencias de la salud. Limusa-Waley. Cuauhtémoc, México D. F., México. 667 p.
- Díaz, A., L. Sáenz-Zúñiga y B. Zutta. 2021. Formación de un humedal en la costa norte del Perú: estabilidad biofísica y diversidad biológica. *Revista Peruana de Biología* 28(3):1-10. Doi: 10.15381/rpb.v28i3.21132.
- Dupuy R., J. M., J. L. Hernández S., R. Hernández J., F. Tun D. y F. May P. 2012. Efectos del cambio de uso del suelo en la biomasa y diversidad de plantas leñosas en un paisaje de bosque tropical seco en Yucatán. *Investigación Ambiental* 4(1):130-140. [https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/1242/1/id26022\\_Dupuy\\_Juan.pdf](https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/1242/1/id26022_Dupuy_Juan.pdf). (30 de octubre de 2023).
- Durán-Medina, E., J. F. Mas y A. Velázquez. 2007. Cambios en las coberturas de vegetación y usos del suelo en regiones con manejo forestal comunitario y áreas naturales protegidas de México. In: Bray, D. B., L. Merino P. y D. Barry (Edits.). *Los bosques comunitarios de México. Manejo sustentable de paisajes forestales*. Instituto Nacional de Ecología (INE-Semarnat) y Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible (CCMSS). Coyoacán, México D. F., México. pp. 267-299.

- Ellis, E. A., A. Navarro M., M. García O., I. U. Hernández G. and D. Chacón C. 2020. Forest cover dynamics in the Selva Maya of Central and Southern Quintana Roo, Mexico: deforestation or degradation? *Journal of Land Use Science* 15(1):25-51. Doi: 10.1080/1747423X.2020.1732489.
- Ellis, E. A., A. Navarro-Martínez and M. García-Ortega. 2021. Drivers of forest cover transitions in the *Selva Maya*, Mexico: Integrating regional and community scales for landscape assessment. *Land Degradation & Development* 32(10):3122-3141. Doi: 10.1002/ldr.3972.
- Ellis, E. A., I. U. Hernández-Gómez y J. A. Romero-Montero. 2017. Los procesos y causas del cambio en la cobertura forestal de la Península Yucatán, México. *Ecosistemas* 26(1):101-111. Doi: 10.7818/ECOS.2017.26-1.16.
- Environmental System Research Institute (ESRI). 2015. ArcGIS version 10.4. Redlands, CA, United States of America. ESRI.
- Estrada-Medina, H., V. Cobos-Gasca, J. L. Acosta-Rodríguez, S. Peña F., ... y R. L. Zapata-Luna. 2016. La sequía de la península de Yucatán. *Tecnología y Ciencias del Agua* 7(5):151-165. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v7n5/2007-2422-tca-7-05-00151.pdf>. (15 de abril de 2023).
- Flachsenberg, H. y H. A. Galletti. 1999. El manejo forestal de la selva en Quintana Roo, México. In: Primack, R. B., D. Bray, H. A. Galletti e I. Ponciano (Edits.). *La Selva Maya: conservación y desarrollo*. Siglo XXI Editores. Coyoacán, México D. F., México. pp. 74-97.
- García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México. Coyoacán, México D. F., México. 90 p.
- Gilabert, M. A., J. González-Piqueras y J. García-Haro. 1997. Acerca de los índices de vegetación. *Revista de Teledetección* 8:1-10. [https://www.researchgate.net/publication/39195330\\_Acerca\\_de\\_los\\_indices\\_de\\_vegetacion](https://www.researchgate.net/publication/39195330_Acerca_de_los_indices_de_vegetacion). (28 de julio de 2023).

- Hammond, N. 1982. Ancient Maya civilization. Rutgers University Press. New Piscataway, NJ, United States of America. 348 p.
- Hernández G., I. U. and E. A. Ellis. 2023. Selective logging and shifting agriculture may help maintain forest biomass on the Yucatan peninsula. *Land Degradation & Development* 34(14):4456-4471. Doi: 10.1002/ldr.4789.
- Hernández-Gómez, I. U., C. R. Cerdán-Cabrera, A. Navarro-Martínez, D. Vázquez-Luna, S. Armenta-Montero and E. A. Ellis. 2019. Assessment of the CLASlite forest monitoring system in detecting disturbance from selective logging in the Selva Maya, Mexico. *Silva Fennica* 53(1):1-10. Doi: 10.14214/sf.10012.
- Hernández-Gómez, I. U., D. Vázquez-Luna, C. R. Cerdán-Cabrera, A. Navarro-Martínez and E. A. Ellis. 2020. Mapping disturbance from selective logging in tropical forest of the Yucatan Peninsula, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 23(1):1-19. Doi: 10.56369/tsaes.2952.
- Hernández-Ramos, J., X. García-Cuevas, R. Pérez-Miranda, A. González-Hernández y L. Martínez-Ángel. 2020. Inventario y mapeo de variables forestales mediante sensores remotos en el estado de Quintana Roo, México. *Madera y Bosques* 26(1):1-17. Doi: 10.21829/myb.2020.2611884.
- Hernández-Stefanoni, J. L., G. Reyes-Palomeque, M. Á. Castillo-Santiago, S. P. George-Chacón, ... and J. M. Dupuy. 2018. Effects of sample plot size and GPS location errors on aboveground biomass estimates from LiDAR in tropical dry forests. *Remote Sensing* 10(10):1586. Doi: 10.3390/rs10101586.
- Hernández-Stefanoni, J. L., M. Á. Castillo-Santiago, J. Andres-Mauricio, C. A. Portillo-Quintero, F. Tun-Dzul and J. M. Dupuy. 2021. Carbon stocks, species diversity and their spatial relationships in the Yucatán Peninsula, Mexico. *Remote Sensing* 13(16):3179. Doi: 10.3390/rs13163179.
- Hernández-Stefanoni, J. L., M. Á. Castillo-Santiago, J. F. Mas, C. E. Wheeler, ... and J. M. Dupuy. 2020. Improving aboveground biomass maps of tropical dry forests by integrating LiDAR, ALOS PALSAR, climate and field data. *Carbon Balance and Management* 15:1-17. Doi: 10.1186/s13021-020-00151-6.

- Huchin O., S. A., A. Navarro-Martínez, E. A. Ellis e I. U. Hernández G. 2022. Deforestación en el municipio de Bacalar, Quintana Roo, México durante el período 1993-2017. *Madera y Bosques* 28(3):1-13. Doi: 10.21829/myb.2022.2832396.
- Huechacona-Ruiz, A. H., J. M. Dupuy, N. B. Schwartz, J. S. Powers, ... and J. L. Hernández-Stefanoni. 2020. Mapping tree species deciduousness of tropical dry forests combining reflectance, spectral unmixing, and texture data from high-resolution imagery. *Forest* 11(11):1234. Doi: 10.3390/f11111234.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi). 2022. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI Landsat, 1984-2021. Aguascalientes, Ags., México. 7 p.  
[https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvini/inegi/productos/nueva\\_estruc/889463908272.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvini/inegi/productos/nueva_estruc/889463908272.pdf). (7 de enero de 2024).
- Lemma, D. B., K. T. Gebretsadik and S. K. Debela. 2021. Forest cover change detection in relation to climate variability and LULC changes using GIS and RS techniques. A case of the Kafa zone, southwest Ethiopia. *Journal of Water and Land Development* (51):152-162. Doi: 10.24425/jwld.2021.139025.
- Manrique, E. G. 1999. Índice de vegetación. Aplicación del NDVI. In: Asociación Española de Teledetección (Edit.). *Teledetección. Avances y Aplicaciones*. VIII Congreso Nacional de Teledetección. Asociación Española de Teledetección. Albacete, AB, España. pp. 217-219.
- Márdero, S., E. Nickl, B. Schmook, L. Schneider, ... y D. Lawrence. 2012. Sequías en el sur de la península de Yucatán: análisis de la variabilidad anual y estacional de la precipitación. *Investigaciones Geográficas* (78):19-33.  
<https://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n78/n78a3.pdf>. (22 de abril de 2023).
- Millano-Tudare, J. L., F. J. Paredes-Trejo, E. Jaimes, N. Pineda, ... e I. Pineda. 2017. Patrones fenológicos de cinco tipos de cobertura en bosque seco tropical, surcojedes, Venezuela. *Revista Agrollania* 14:106-112.  
<http://www.postgradovipi.50webs.com/archivos/agrollania/2017/agro16.pdf>. (14 de septiembre de 2023).

Moizo M., P. 2004. La percepción remota y la tecnología SIG: una aplicación en Ecología de Paisaje. *GeoFocus Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica* (4):1-24. <https://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/40>. (12 de septiembre de 2023).

Navarro M., M. A. 2015. Diagnóstico del estado actual de *Swietenia macrophylla* King (caoba) en los bosques manejados de Quintana Roo, México: perspectivas para su manejo. Tesis de Doctorado. Centro de Investigaciones Tropicales, Universidad Veracruzana. Xalapa-Enríquez, Ver., México. 132 p.

Navarro M., M. A. y D. Granados S. 1997. Dinámica sucesional en un bosque tropical afectado por disturbios en la zona norte de Quintana Roo. *Revista Chapingo Ciencias Forestales* 1:5-16. <https://es.scribd.com/document/456410413/rchscfaIII2164-pdf>. (18 de agosto de 2023).

Navarro M., M. A., B. Schmook y J. Martínez C. 2000. Manejo tradicional de hubches en una comunidad maya de Quintana Roo. *Foresta Veracruzana* 2(1):19-30. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49720102>. (20 de agosto de 2023).

Navarro-Martínez, A., R. Durán-García y M. Méndez-González. 2012. El impacto del huracán *Dean* sobre la estructura y composición arbórea de un bosque manejado en Quintana Roo, México. *Madera y Bosques* 18(1):57-76. Doi: 10.21829/myb.2012.1811138.

Navarro-Martínez, M. A. 2011. La caoba. Más de un siglo de aprovechamiento. In: Pozo, C., N. Armijo C. y S. Calmé (Edits.). *Riqueza biológica de Quintana Roo. Un análisis para su conservación*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio), Colegio de la Frontera Sur (Ecosur) y Gobierno del Estado de Quintana Roo. Tlalpan, México D. F., México. pp. 212-220.

Parenti, M. S. 2015. Hurricane effects on mangrove canopies observed from MODIS and SPOT imagery. Cornell University. Ithaca, NY, United States of America. 48 p.

Pat-Aké, I., L. del C. Cámara-Cabrales, S. Ward, P. Martínez-Zurimendi, ... y N. Sorensen. 2018. Efecto del huracán Dean en la dinámica estructural de selvas bajo

manejo forestal en Quintana Roo, México. *Madera y Bosques* 24(2):1-17. Doi: 10.21829/myb.2018.2421585.

Pettorelli, N., J. O. Vik, A. Mysterud, J. M. Gaillard, C. J. Tucker and N. C. Stenseth. 2005. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution* 20(9):503-510. Doi: 10.1016/j.tree.2005.05.011.

Rivera-Monroy, V. H., L. M. Farfán, L. Brito-Castillo, J. Cortés-Ramos, ... and J. I. Euan-Ávila. 2020. Tropical cyclone landfall frequency and large-scale environmental impacts along Karstic Coastal Regions (Yucatan Peninsula, Mexico). *Applied Sciences* 10(17):5815. Doi: 10.3390/app10175815.

Rodstrom, C., S. Olivieri y L. Tangley. 1999. Un enfoque regional de la conservación en la Selva Maya. In: Primack, R. B., D. Bray, H. A. Galletti e I. Ponciano (Edits.). *La Selva Maya: conservación y desarrollo*. Siglo XXI Editores. Coyoacán, México D. F., México. pp. 23-42.

Ruiz D., M. E., M. E. Orozco H., R. Granados R. y G. Álvarez A. 2017. Cambio de uso de suelo e índice de vegetación de diferencia normalizada (*NDVI*), subcuenta del Río Salado, México. *Geografía y Sistemas de Información Geográfica* 9(9):39-50. <http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/68525/02%20Cambio%20de%20uso%20de%20suelo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. (14 de abril de 2023).

Sánchez-Rivera, G. and L. Gómez-Mendoza. 2022. Tropical cyclone effects on vegetation resilience in the Yucatan Peninsula, México, between 2000-2012. *Investigaciones Geográficas* (77):203-220. Doi: 10.14198/INGEO.18499.

Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana (SSPC) y Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred). 2021. *Guía básica para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de peligros y riesgos. Evaluación de la vulnerabilidad física y social*. SSPC y Cenapred. Coyoacán, Cd. Mx., México. 166 p. <https://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/57.pdf>. (20 de agosto de 2023).

- Snook, L. K. 1993. Stand dynamics of mahogany (*Swietenia macrophylla* King) and associated species after fire and hurricane in the tropical forest of the Yucatan Peninsula, Mexico. Dissertation, Doctor of Forestry. Faculty of the School of Forestry and Environmental Studies, Yale University. 254 p.
- Snook, L. K. 2005. Aprovechamiento sostenido de caoba en la Selva Maya de México. De la conservación fortuita al manejo sostenible. Recursos Naturales y Ambiente (44):9-18. [https://www.cifor.org/publications/pdf\\_files/articles/ASnook0505.pdf](https://www.cifor.org/publications/pdf_files/articles/ASnook0505.pdf). (12 de abril de 2023).
- Suárez, E., A. M. Sánchez, E. F. Cabrera y T. Pulido. 1994. Estudio integral de la frontera México-Belice, Recursos Naturales. Centro de Investigaciones de Quintana Roo A. C. Chetumal, Q. Roo, México. 211 p.
- Tecuapetla-Gómez, I., A. Carbajal-Domínguez y V. Montesinos-Chica. 2022. Clasificación de tendencias de NDVI en la Península de Yucatán, México, de 2014 a 2020. Investigaciones Geográficas (109):1-19. Doi: 10.14350/rig.60629.
- Tobasura M., D. 2017. Mitigación del cambio climático en Felipe Carrillo Puerto, México: Expectativas y divisiones por el territorio. Ecología Política (53):80-83. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6063837>. (15 de mayo de 2023).
- Torres-Rojas, G., M. E. Romero-Sánchez, E. Velasco-Bautista y A. González-Hernández. 2016. Estimación de parámetros forestales en bosques de coníferas con técnicas de percepción remota. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 7(36):7-24. Doi: 10.29298/rmcf.v7i36.56.
- Vázquez, P., E. Adema y B. Fernández. 2013. Dinámica de la fenología de la vegetación a partir de series temporales de NDVI de largo plazo en la provincia de La Pampa. Ecología Austral 23:77-86. <http://www.scielo.org.ar/pdf/ecoaus/v23n2/v23n2a01.pdf>. (13 de junio de 2023).
- Vega G., Á., J. López-García y L. de L. Manzo D. 2008. Análisis espectral y visual de vegetación y uso del suelo con imágenes Landsat ETM+ con apoyo de fotografías aéreas digitales en el Corredor Biológico Chichinautzin, Morelos, México.

Investigaciones Geográficas Boletín del Instituto de Geografía (67):59-75. Doi: 10.14350/rig.17990.

Vester, H. F. M. y M. A. Navarro M. 2007. Árboles maderables de Quintana Roo: fichas ecológicas. El Colegio de la Frontera Sur (Ecosur), Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), Gobierno del Estado de Quintana Roo y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio). Chetumal, QR, México. 139 p.



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 [Atribución-No Comercial \(CC BY-NC 4.0 Internacional\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.