

7. Análisis espaciotemporal de incendios forestales en ejidos del sur de la Península de Yucatán (2012-2021)

JOSÉ FRANCISCO LÓPEZ TOLEDO*

JOSÉ MANUEL CAMACHO SANABRIA**

JUAN CARLOS ALCÉRRECA HUERTA***

ROSALÍA CHÁVEZ ALVARADO****

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.279.07>

Resumen

Los incendios forestales son una amenaza creciente para los recursos forestales y la biodiversidad. Su caracterización es de gran importancia para el diseño de estrategias de manejo del fuego. Por esta razón, se construyó un Índice Espaciotemporal de Incendios Forestales (IETIF), a partir del análisis de indicadores del régimen de incendios forestales para un periodo de diez años (2012-2021), tomando como unidad de análisis espacial los ejidos ubicados dentro del Área de Importancia para la Conservación de las Aves 197. Se calcularon indicadores de extensión, frecuencia, recurrencia y estacionalidad de los incendios, utilizando datos de puntos de calor y de perímetros de los conglomerados de puntos de calor del Sistema de Predicción de Peligro de Incendios Forestales (SPPIF) de México. Los valores estandarizados de los indicadores y el IETIF fueron categorizados en cinco niveles para su

* Estudiante de doctorado en Geografía. Docente de la carrera de Ingeniería Forestal y del Posgrado en Agroecosistemas Sostenibles en el Tecnológico Nacional de México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7080-2795>; correo: franck_lopez18@yahoo.com.mx

** Doctor en Ciencias Ambientales. Profesor-investigador de la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, Campus Chetumal Bahía, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0366-0613>; Scopus: 56820283800

*** Doctor en Ingeniería (Hidromecánica). Profesor-investigador de El Colegio de la Frontera Sur, Unidad Chetumal, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6325-3118>; Scopus: 2-s2.0-85128480694

**** Doctora en Asuntos Urbanos. Profesora-investigadora de la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, Campus Chetumal Bahía, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3468-9283>

posterior representación espacial. Los resultados permitieron identificar conglomerados de ejidos como zonas críticas de afectación por incendios, así como su relación con rasgos productivos que caracterizan a dichos ejidos, tales como la actividad agropecuaria y la presencia de áreas invadidas por *Pteridium aquilinum* en ejidos con IETIF muy alto y, por otro lado, ejidos con manejo forestal que presentaron IETIF bajo y muy bajo. Se sugiere establecer brigadas comunitarias de manejo del fuego en localidades ubicadas al centro de las zonas críticas.

Palabras clave: *régimen de incendios, extensión, frecuencia, recurrencia, estacionalidad.*

Introducción

Los incendios forestales son eventos que pueden afectar a las coberturas forestales, la biodiversidad y alterar los procesos hidrológicos en ecosistemas sensibles al fuego (Villar-Hernández *et al.*, 2022). Si bien pueden ocurrir de manera natural como parte de la ecología de sabanas, matorrales, bosques templados y boreales (Pompa-García *et al.*, 2018a), la alteración de los patrones espacio-temporales de los incendios forestales representa una amenaza crítica para los recursos forestales (Villar-Hernández *et al.*, 2022).

En los últimos diez años, en el mundo se ha incrementado 20% la duración de la temporada de incendios forestales debido al cambio climático (Zamudio *et al.*, 2023) y, con ello, la frecuencia, extensión y severidad (Pompa-García *et al.*, 2018a). Entre los incendios forestales de gran magnitud, ocurridos recientemente en el mundo, figuran los del Amazonas y el Ártico, en 2019; Australia en 2009, 2019 y 2020; Canadá en 2016; Chile en 2017; Grecia en 2007 y 2018; Indonesia en 2019; Portugal en 2003, 2005 y 2017; la Federación de Rusia en 2010; y los Estados Unidos de América en 2013, 2017, 2018 y 2019 (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2021). En México, durante el periodo 1970 al 2019 se presentaron en promedio 7 095 incendios, con 260 998 hectáreas afectadas, anualmente, donde destacan los años de 1998, 2011 y 2017, como los más críticos por su extensión (Comisión Nacional Forestal [Conafor], 2020).

La comprensión de los patrones de distribución espacial y temporal de los incendios es de gran relevancia para su prevención y manejo (Zúñiga-Vásquez *et al.*, 2017; Gutiérrez Martínez *et al.*, 2018; Flores-Garnica *et al.*, 2021). En este sentido, la disciplina encargada de comprender los rasgos que definen el comportamiento del fuego y su relación con los efectos ecológicos en los organismos vivos y el entorno físico, es la ecología del fuego (Cochrane y Ryan, 2009). Dicha disciplina, a través del régimen de incendios, analiza indicadores de extensión, frecuencia, estacionalidad, intensidad y severidad en un área concreta, así como sus efectos ecológicos (Jardel *et al.*, 2014; Díaz-Delgado y Ruiz-Ramos, 2019).

La extensión es el tamaño de un incendio, mientras que la frecuencia mide cuán habituales son estos eventos en un ecosistema determinado. La recurrencia es el intervalo promedio de tiempo entre incendios en un área específica y está muy ligada a la frecuencia. La estacionalidad describe los períodos del año en los que los incendios son más comunes, típicamente limitándose a la estación seca o a periodos de sequía inusual (como en fenómenos de El Niño o La Niña). Sin embargo, las alteraciones de los atributos en un ecosistema pueden modificar el comportamiento del fuego y dar lugar a nuevos regímenes (Cochrane y Ryan, 2009; Díaz-Delgado y Ruiz-Ramos, 2019).

La caracterización del régimen de incendios es fundamental para comprender el papel del fuego en la estructura y función de los ecosistemas, por lo que es crucial para la planificación estratégica a largo plazo (Cochrane y Ryan, 2009). El análisis de estos rasgos se puede llevar a cabo mediante los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y datos de sensores remotos (Zúñiga-Vásquez *et al.*, 2017; Gutiérrez Martínez *et al.*, 2018; Flores-Garnica *et al.*, 2021).

A nivel internacional, los SIG y datos de sensores remotos se han utilizado para detectar incendios a distintas escalas (Chuvieco, 2009; Chuvieco *et al.*, 2019; Briones-Herrera *et al.*, 2020), realizar comparaciones con registros de campo (Lim *et al.*, 2019), elaborar mapas de predicción (Murthy *et al.*, 2019), analizar factores causales (Reyes-Bueno y Balcázar-Gallegos, 2021), delimitar áreas quemadas (da Silva *et al.*, 2023) y evaluar la pérdida global de bosques por incendios (van Wees *et al.*, 2021; Tyukavina *et al.*, 2022).

En México, se han llevado a cabo estudios que caracterizan los incendios forestales en períodos de entre cinco y 20 años, tanto a nivel nacional como estatal, considerando variables ambientales y antropogénicas para generar modelos predictivos. Para esto se han utilizado indicadores de probabilidad de incendios (Villar-Hernández *et al.*, 2022; Zúñiga-Vásquez *et al.*, 2017; García *et al.*, 2012), frecuencia (Pompa-García *et al.*, 2018a; Gutiérrez Martínez *et al.*, 2018), índice de recurrencia (Pompa-García *et al.*, 2018b), superficie afectada (Vilchis-Francés *et al.*, 2015; Pérez-Verdín *et al.*, 2013; Gutiérrez Martínez *et al.*, 2018) y número de días requeridos para la extinción (Pérez-Verdín *et al.*, 2013), así como índices de afectación y severidad (Gutiérrez Martínez *et al.*, 2018).

Pompa-García *et al.* (2018b) propusieron un modelo conceptual del potencial de incendios mediante una sumatoria lineal estandarizada de valores asignados a los componentes de combustibles, meteorología, topografía y causas en polígonos previamente definidos. Por su parte, Gutiérrez Martínez *et al.* (2018) establecieron el régimen de incendios de vegetación en el Estado de México, categorizando los valores de cada variable para caracterizar los disturbios a nivel municipal y regional.

En lo que respecta a las fuentes de datos sobre incendios forestales, éstas son diversas, incluidas plataformas que ofrecen información sobre puntos de calor detectados por los sensores MODIS y VIIRS. Un ejemplo de esto es el Sistema de Predicción de Peligro de Incendios Forestales (SPPIF) de México (<https://forestales.ujed.mx/incendios2/>).

A pesar de estos avances, la aplicación de herramientas SIG y productos de sensores remotos para el análisis espaciotemporal de incendios forestales en México, especialmente en sus ecosistemas tropicales, aún es limitada (Manzo-Delgado y López-García, 2020; Neger, Manzo-Delgado y Galicia-Sarmiento, 2022; Zamudio *et al.*, 2023).

Cabe destacar que las selvas son ecosistemas particularmente sensibles al fuego, ya que su estructura y biodiversidad pueden verse gravemente afectadas tras un incendio. Naturalmente, los incendios en estos ecosistemas son esporádicos y, en ocasiones, catastróficos, especialmente bajo condiciones meteorológicas propicias (Rodríguez-Trejo, 2008; Cochrane, 2009). La intervención humana ha alterado aún más el régimen del fuego en las selvas, en gran parte debido a la expansión de actividades agropecuarias,

con la pecuaria como un factor altamente asociado a los incendios, dado que el fuego se utiliza como herramienta de manejo de praderas (Flores-Garnica, 2021).

Por lo tanto, este trabajo busca integrar los rasgos espaciales y temporales que describen el régimen de incendios, con la finalidad de caracterizar el patrón de incendios a lo largo de un periodo corto (10 años) en espacios concretos (ejidos). El objetivo es construir un índice que analice y represente espacialmente los principales rasgos de los incendios forestales, facilitando la toma de decisiones en el manejo integral del fuego.

Método

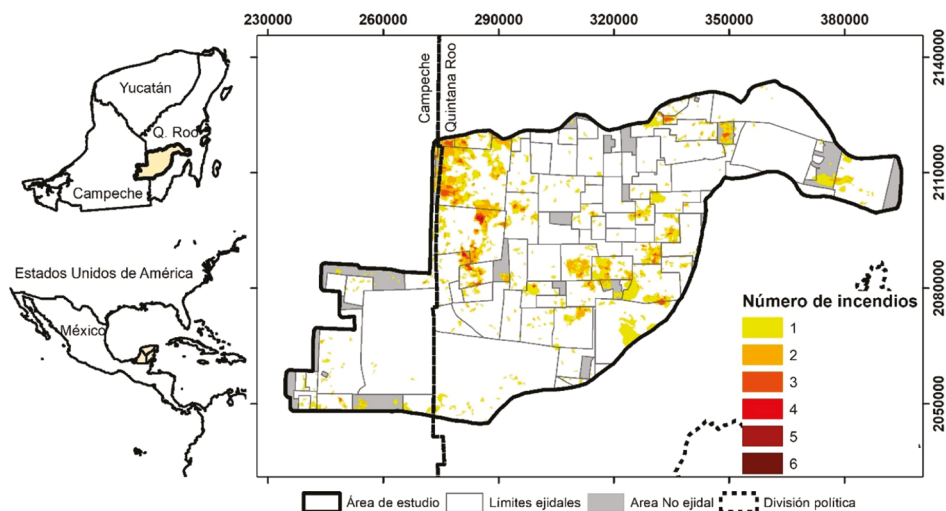
En el presente trabajo se propone un índice espaciotemporal de incendios forestales (IETIF), que integra variables de corte espacial, como la extensión, con aquellas de corte temporal, como la frecuencia, recurrencia y la estacionalidad de los incendios.

Se utilizó como zona de estudio un polígono ampliado en un kilómetro hacia su exterior del Área de Importancia para la Conservación de las Aves 197 (AICA-197), el cual tiene una extensión de 670 000 ha y se ubica en la porción sur de la Península de Yucatán, entre los estados mexicanos de Quintana Roo y Campeche (fig. 1). En el área de estudio predomina la vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia y de selva baja espinosa subperennifolia, así como usos de suelo con fines agropecuarios (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi], 2018). La AICA 197 forma parte del corredor biológico Calakmul-Sian Ka'an y conecta a cinco Áreas Naturales Protegidas (ANP) (Díaz-Gallegos *et al.*, 2008; Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [Conabio], 2015).

Se emplearon puntos de calor (PC) y perímetros de conglomerados de puntos de calor (PCPC) históricos anuales correspondientes al período 2012–2021 del Sistema de Predicción de Peligro de Incendios Forestales de México (SPPIF; <http://forestales.ujed.mx/incendios2>). Los PC provienen de los sensores MODIS y VIIRS con resolución espacial de 1 000 y 375 m, respectivamente, a partir de los cuales se obtienen los PCPC mediante estimación rápida por interpolación automática (Briones-Herrera *et al.*, 2020).

Como unidad de análisis espacial, se seleccionaron los polígonos de los ejidos dentro del área de estudio (Registro Agrario Nacional [RAN], 2017), resultando en 81 ejidos, algunos de los cuales fueron recortados debido a que su extensión se encontraba fuera del área de estudio. La elección de los ejidos se justifica por las diferencias en su percepción, organización y manejo del entorno, influenciadas por sus antecedentes culturales e históricos, lo que puede ofrecer variables explicativas relacionadas con la ocurrencia de incendios forestales (Ríos-Quiroz *et al.*, 2021).

Figura 1. Ubicación del área de estudio, que corresponde al Área de Importancia para la Conservación de la Aves (AICA) 197, se representa la frecuencia de incendios forestales en el periodo 2012-2021 y ejidos



Fuente: elaboración propia a partir de perímetros de conglomerados de puntos de calor (PCPC) históricos anuales correspondientes al periodo 2012-2021, del Sistema de Predicción de Peligro de Incendios Forestales de México (SPPIF; <http://forestales.ujed.mx/incendios2>) y perimetrales de los núcleos agrarios de los estados de Campeche y Quintana Roo (Registro Agrario Nacional [RAN], 2017).

Mediante geoprocesamiento de los datos con el programa *ArcGis* 10.8® se calcularon cuatro indicadores descriptores de incendios: extensión (AQx), frecuencia (F), recurrencia (REC) y estacionalidad (EST) (cuadro 1), con los cuales se integraron en el IETIF, que permite hacer una clasificación de los ejidos en diferentes niveles de afectación, por incendios forestales.

Para el establecimiento del IETIF se construyó una matriz con los cuatro indicadores, cuyos valores fueron estandarizados a escala de 0 – 1, para lo cual se definió previamente el rango de datos como resultado de la diferencia entre los valores máximos y mínimos. Asimismo, la escala se dividió en cinco partes iguales cada una asignada a las categorías: *a)* muy bajo, *b)* bajo, *c)* medio, *d)* alto y *e)* muy alto (cuadro 1) (Flores-Garnica y Flores-Rodríguez, 2020). Mediante el promedio de los valores estandarizados se obtuvo el IETIF para cada ejido (ec. 1). Se elaboraron mapas de clasificación por semaforización de los ejidos de acuerdo con los cinco niveles establecidos, tanto de los cuatro indicadores calculados como del IETIF,

$$IETIF = \frac{\sum \text{AQr VE, Frec. VE, Rec. VE, Est. VE}}{4} \quad \text{ec. (1)}$$

Tabla 1. Indicadores espacio-temporales del régimen de incendios

Indicador	Rango de valores por nivel					Descripción
	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto	
Extensión (AQr)	8.6% ≥	8.7% – 17.2%	17.3% – 25.8%	25.9% – 34.4%	34.5% ≤	Porcentaje de superficie ejidal con incendios
Frecuencia (Frec)	1 ≥	2	3	4	5 ≤	Número de incendios en un mismo polígono
Recurrencia (Rec)	4.32 ≤ y 0	3.63 - 4.31	2.94 - 3.62	2.25 - 2.93	1.56 - 2.24	Promedio de años entre incendios en un mismo polígono
Estacionalidad (Est)	0 – 2	3 – 4	5 – 6	7 – 8	9 ≤	Número de meses con incendios
Valores estandarizados (VE)	0.000 – 0.199	0.200 – 0.399	0.400 – 0.599	0.600 – 0.799	0.800 – 1	

Fuente: elaboración propia a partir de puntos de calor (PC) y perímetros de conglomerados de puntos de calor (PCPC) históricos anuales, correspondientes al periodo 2012–2021 del Sistema de Predicción de Peligro de Incendios Forestales de México (SPPIF; <http://forestales.ujed.mx/incendios2>)

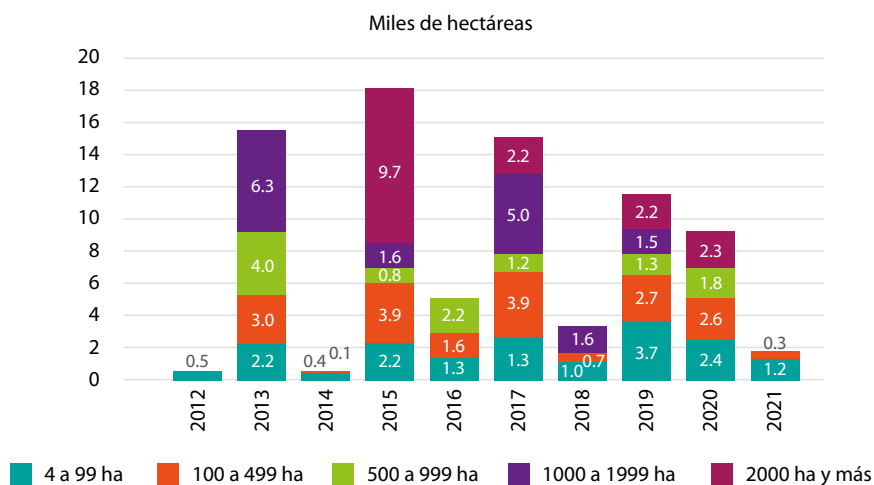
donde: AQr VE, Frec. VE, Rec. VE y Est. VE corresponden a los valores estandarizados de la extensión, frecuencia, recurrencia y estacionalidad de incendios, respectivamente.

Resultados

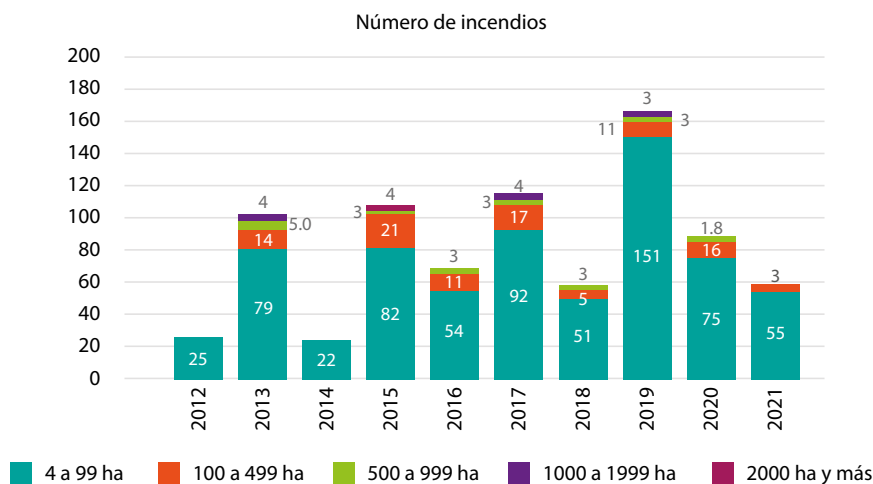
El análisis espacio-temporal de los incendios forestales, utilizando datos de los sensores MODIS y VIIRS, permitió obtener una comprensión del patrón de incendios en las selvas y áreas perturbadas del sur de la Península de Yucatán. En términos de extensión, se observó que durante el período de estudio (2012–2021), solo 9% de la superficie del área analizada (60 917.7 ha) experimentó incendios. De esta superficie, 44 526 ha (equivalente al 6.6%) se quemaron una única vez, representando el 73% del área total quemada, mientras que sólo el 27% registró una frecuencia superior a uno.

Se registró un total de 811 incendios, de los cuales la mayoría (84.5%) fueron de baja extensión (<100 ha), abarcando únicamente el 29% (17 693.5 ha) del área quemada durante el periodo considerado. En contraste, los incendios de mayor extensión (≥ 2000 ha) afectaron el 26% del área total, a pesar de ocurrir en sólo seis eventos (0.7%) (gráficas 1 y 2).

Gráfica 1. Clasificación de las superficies de incendios por clase de tamaño



Fuente: elaboración propia a partir de perímetros de conglomerados de puntos de calor (PCPC) históricos anuales, correspondientes al periodo 2012-2021 del Sistema de Predicción de Peligro de Incendios Forestales de México (SPPIF; <http://forestales.ujed.mx/incendios2>).

Gráfica 2. Número de incendios por clase de tamaño

Fuente: elaboración propia a partir de perímetros de conglomerados de puntos de calor (PCPC) históricos anuales, correspondientes al periodo 2012–2021 del Sistema de Predicción de Peligro de Incendios Forestales de México (SPPIF; <http://forestales.ujed.mx/incendios2>).

A continuación, se presenta la cartografía de los indicadores de extensión, frecuencia, recurrencia y estacionalidad de los incendios analizados en el AICA 197, durante el periodo 2012-2021. Este análisis revela cómo cada uno de estos indicadores prioriza de manera distinta las unidades espaciales (ejidos) examinadas.

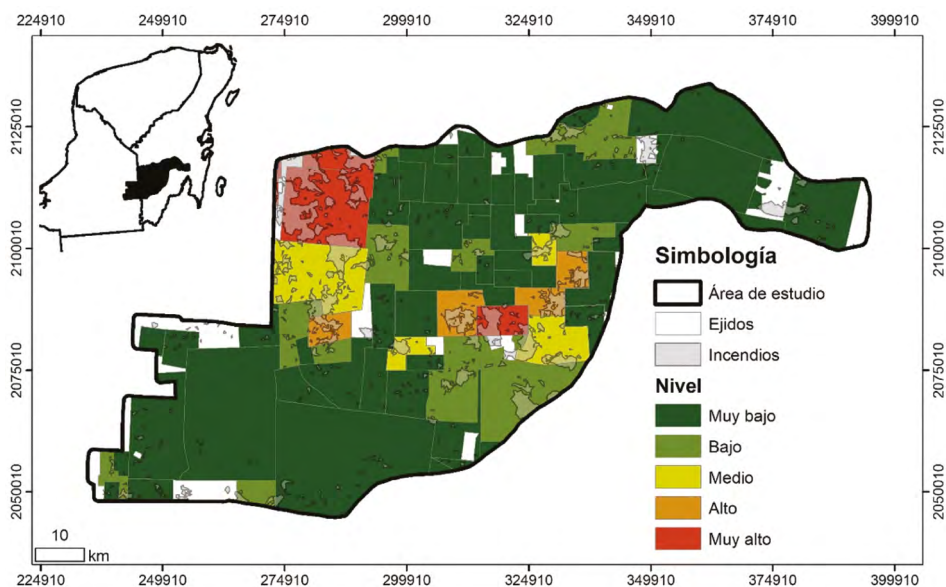
En el análisis espacial de la extensión, se identificaron dos conglomerados de ejidos con mayor afectación: el noroeste y el centro-este, donde se registró al menos un caso con nivel de afectación muy alto. Este indicador, de naturaleza espacial y poco sensible, clasificó en total a sólo cuatro ejidos con nivel muy alto, los cuales representan el 6% de la superficie del área de estudio. Es importante señalar que la actividad productiva predominante en estos ejidos es la agropecuaria, y algunos de ellos presentan áreas invadidas por *Pteridium aquilinum*. En contraste, la mayoría de los ejidos (55) se clasificaron con nivel muy bajo, ocupando el 62% de la superficie del área de estudio. Estos ejidos se distribuyen principalmente en las zonas norte-centro, noreste y suroeste, coincidiendo en gran medida con áreas de

coberturas forestales relativamente conservadas. Además, varios de estos ejidos implementan actualmente programas de manejo forestal (figura 2).

En el análisis de frecuencia, se reflejaron los mismos dos conglomerados que en la extensión, aunque sólo uno mostró dos casos con nivel muy alto, abarcando el 5% de la superficie del área de estudio. Este indicador también permitió identificar un tercer conglomerado en la parte noreste. A diferencia del indicador de extensión, la frecuencia es de tipo temporal y reveló un mayor número de ejidos con nivel alto (13), que representan el 14% del área de estudio. Se observó un menor número de ejidos con nivel muy bajo (33), entre los cuales se incluyen aquellos con una larga tradición de manejo forestal sustentable, como Noh Bec, Petcacab y Nuevo Becal (figura 3).

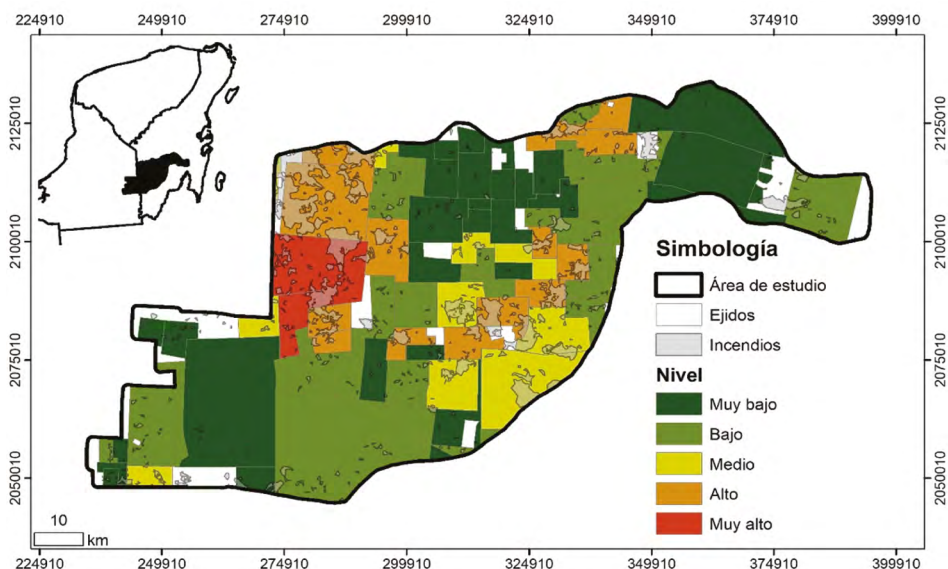
La recurrencia amplió considerablemente el número de ejidos clasificados en niveles medio (13), alto (14) y muy alto (12), conectando los tres conglomerados identificados en la extensión y la frecuencia, además de re-

Figura 2. Niveles de extensión de incendios forestales (según su proporción de área quemada) en ejidos ubicados dentro del área de estudio, para el periodo 2012-2021



Fuente: elaboración propia a partir de perímetros de conglomerados de puntos de calor (PCPC) históricos anuales correspondientes al periodo 2012-2021 del Sistema de Predicción de Peligro de Incendios Forestales de México (SPPIF; <http://forestales.ujed.mx/incendios2>) y perimetrales de los núcleos agrarios de los estados de Campeche y Quintana Roo (Registro Agrario Nacional [RAN], 2017).

Figura 3. Niveles de frecuencia (número de veces que han ocurrido incendios en un mismo sitio) de incendios forestales en ejidos del área de estudio, para el periodo 2012-2021



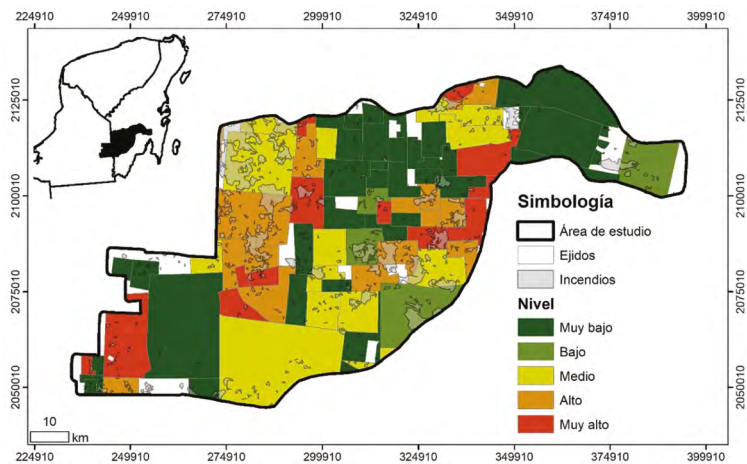
Fuente: elaboración propia a partir de perímetros de conglomerados de puntos de calor (PCPC) históricos anuales, correspondientes al periodo 2012-2021 del Sistema de Predicción de Peligro de Incendios Forestales de México (SPPIF; <http://forestales.ujed.mx/incendios2>) y perimetrales de los núcleos agrarios de los estados de Campeche y Quintana Roo (Registro Agrario Nacional [RAN], 2017).

velar un cuarto conglomerado en el suroeste. Este indicador es especialmente sensible y relevante en la dimensión temporal, ya que indica que el 26% del área afectada ha experimentado incendios en más de una ocasión, con una frecuencia de ocurrencia en periodos cortos (aproximadamente dos años) (figura 4).

Por último, el análisis de estacionalidad mostró 11 ejidos con nivel muy alto, que ocupan el 20% de la superficie del área de estudio. Estos ejidos difieren de los identificados en la recurrencia, lo que resalta la sensibilidad de este indicador. Asimismo, se registró el menor número de ejidos con nivel muy bajo (30), que acumulan el 24% de la superficie total. Los meses con mayor incidencia de incendios fueron marzo, abril y mayo, que abarcaron el 83% de los eventos (figura 5).

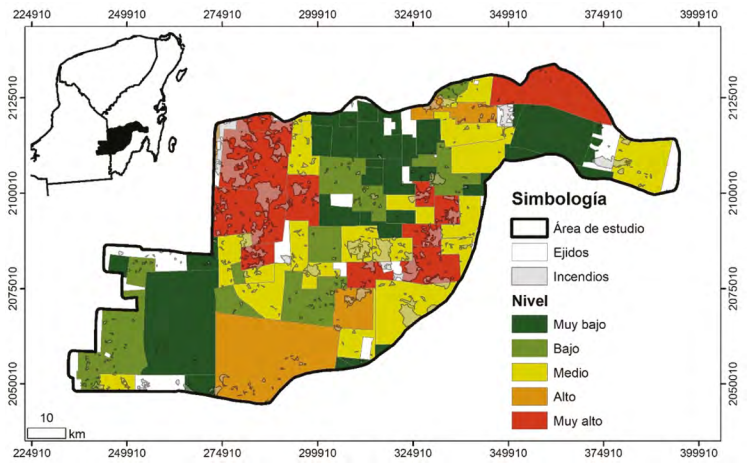
La integración de los cuatro indicadores (extensión, frecuencia, recurrencia y estacionalidad) permitió identificar cuatro conglomerados de eji-

Figura 4. Niveles de recurrencia (número de años transcurridos entre dos incendios consecutivos en el mismo sitio) de incendios forestales en ejidos del área de estudio para el periodo 2012-2021



Fuente: elaboración propia a partir de perímetros de conglomerados de puntos de calor (PCPC) históricos anuales, correspondientes al periodo 2012 – 2021 del Sistema de Predicción de Peligro de Incendios Forestales de México (SPPIF; <http://forestales.ujed.mx/incendios2>) y perimetrales de los núcleos agrarios de los estados de Campeche y Quintana Roo (Registro Agrario Nacional [RAN], 2017).

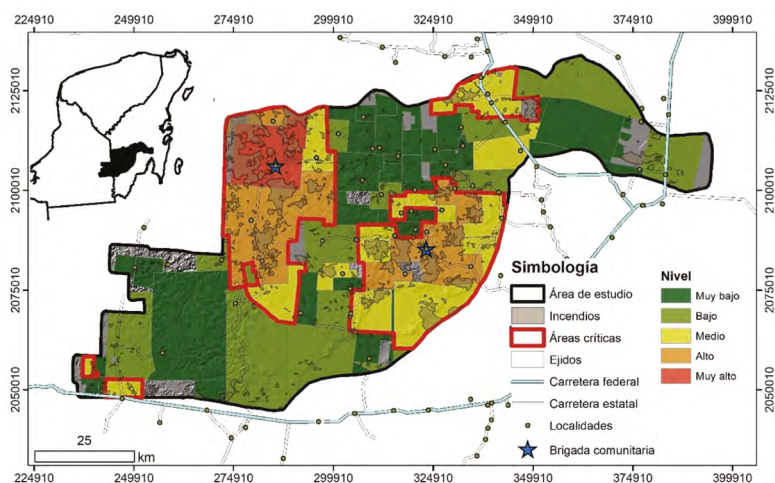
Figura 5. Niveles de estacionalidad (número de meses que duró la temporada de incendios) en los ejidos del área de estudio, para el periodo 2012-2021



Fuente: elaboración propia a partir de puntos de calor (PC) y perímetros de conglomerados de puntos de calor (PCPC) históricos anuales, correspondientes al periodo 2012–2021 del Sistema de Predicción de Peligro de Incendios Forestales de México (SPPIF; <http://forestales.ujed.mx/incendios2>) y perimetrales de los núcleos agrarios de los estados de Campeche y Quintana Roo (Registro Agrario Nacional [RAN], 2017).

dos. Sin embargo, dos de ellos son especialmente significativos por el número de ejidos que agrupan (>10) y por sus niveles de IETIF, alto y muy alto. Esta información es crucial para la implementación de estrategias concretas de manejo del fuego; por ejemplo, sería recomendable considerar las localidades situadas en el centro de estos conglomerados para establecer brigadas comunitarias de manejo del fuego (figura 6).

Figura 6. Niveles del índice espacio temporal de incendios forestales (IETIF) (2012–2021) en el Área de Importancia para la Conservación de la Aves 197, se consideran los ejidos como unidades espaciales



Fuente: elaboración propia a partir de perímetros de conglomerados de puntos de calor (PCPC) históricos anuales, correspondientes al periodo 2012–2021 del Sistema de Predicción de Peligro de Incendios Forestales de México (SPPIF; <http://forestales.ujed.mx/incendios2>) y perimetrales de los núcleos agrarios de los estados de Campeche y Quintana Roo (Registro Agrario Nacional [RAN], 2017). Se delimitan en rojo las áreas críticas y se señalan con estrellas azules los centros de población de los ejidos, donde se observa la necesidad de instaurar brigadas comunitarias de manejo del fuego.

Discusión

El uso de puntos de calor (PC) y perímetros de conglomerados de puntos de calor (PCPC), provenientes de los sensores MODIS y VIIRS, ha sido fundamental en este estudio. Estos insumos han sido procesados previamente de manera automatizada y están fácilmente accesibles a través del Sistema

de Predicción de Peligro de Incendios Forestales de México, una plataforma digital diseñada específicamente para este país (Briones-Herrera *et al.*, 2020).

Los métodos de geoprocésamiento aplicados con herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para calcular los cuatro indicadores y el índice espacio temporal de incendios forestales (IETIF), son relativamente sencillos y fáciles de interpretar. Resultan cruciales para analizar la dinámica espaciotemporal de los incendios forestales a mesoescala, específicamente en unidades ejidales. Estos métodos han permitido identificar patrones de incendios en el sur de la Península de Yucatán durante el periodo de 2012 a 2021.

A diferencia de este estudio, investigaciones previas han analizado la distribución espacial y temporal de los incendios forestales a escalas más pequeñas, como municipal, estatal y nacional. Por ejemplo, Gutiérrez Martínez *et al.* (2018) utilizaron municipios y regiones del Estado de México para caracterizar el régimen de incendios, construyendo un índice de afectación que clasifica en cuatro niveles (nulo, bajo, medio y alto) durante un periodo de 11 años. Por su parte, Villar-Hernández *et al.* (2022) emplearon cuadrículas de 10 km² para analizar la densidad de puntos de calor en Oaxaca, en un marco temporal de 19 años. Zúñiga-Vásquez *et al.* (2017) también utilizaron cuadrículas de 0.5° (≈ 50 km) para identificar patrones de agrupamiento espacial de puntos de calor en México, a lo largo de 11 años.

Al proponer los ejidos como unidades de análisis espacial, se facilita la asociación entre la problemática de incendios y los antecedentes culturales y prácticas productivas locales. Esta perspectiva ayuda a comprender mejor los patrones espacio-temporales desde una perspectiva local. El IETIF ha permitido jerarquizar los ejidos del AICA 197, en cinco niveles de afectación, así como su representación cartográfica.

Los resultados destacan áreas críticas donde se agrupan ejidos con incendios de gran extensión (≥ 2000 ha) y reincidentes, diferenciándose de zonas con eventos más pequeños (< 100 ha) y sin repetición. Este comportamiento es similar al observado por Manzo-Delgado y Galicia-Sarmiento (2022) en áreas de uso agropecuario y vegetación secundaria. Otros autores, como Carrillo-García *et al.* (2012), Pérez-Verdín *et al.* (2013), Flores-Garnica *et al.* (2021), Villar-Hernández *et al.* (2022) y Zúñiga-Vásquez *et al.* (2017), han documentado patrones similares en diversas regiones de México utilizando técnicas de geoestadística. Estas áreas requieren atención y

evidencian la necesidad de implementar acciones de sensibilización, promoción de la cultura de manejo del fuego, formación de brigadas comunitarias, participación de distintos niveles de gobierno y el involucramiento de ejidos circundantes.

Un patrón adicional identificado es que los incendios de gran superficie (≥ 2000 ha) fueron escasos (sólo seis eventos), pero abarcaron una cuarta parte de la superficie total afectada. En contraste, los incendios de menor extensión (< 100 ha) fueron más comunes (84% de los casos) y afectaron áreas comparables a las de los incendios más grandes (29%). Este fenómeno coincide con observaciones de Neger *et al.* (2022) a nivel nacional, así como con los estudios de Manzo-Delgado y Galicia-Sarmiento (2022) en las selvas húmedas de la Reserva de la Biosfera Montes Azules, en Chiapas, y Gutiérrez-Martínez *et al.* (2018), en el Estado de México.

Se observó que en los ejidos más afectados predomina la actividad agropecuaria, y estos también presentan áreas invadidas por *Pteridium aquilinum*, una especie asociada al fuego. Esto respalda la evidencia de que la mayoría de los incendios forestales son provocados por actividades antropogénicas, como la agricultura y la ganadería, en las cuales se utiliza el fuego para preparar las tierras (Flores-Garnica *et al.*, 2021), especialmente en ecosistemas tropicales húmedos (Tyukavina *et al.*, 2022).

La baja proporción del área afectada por incendios (9%), junto con el hecho de que tres cuartas partes de esta superficie sólo registraron un evento durante el periodo analizado, sugiere una baja frecuencia de incendios. Esto concuerda con lo planteado por Rodríguez-Trejo (2008) y Cochrane y Ryan (2009), quienes indican que los incendios en las selvas suelen ser esporádicos, aunque catastróficos cuando ocurren. Por otro lado, en la pequeña porción que presentó una frecuencia mayor a un incendio, éstos ocurrieron en un promedio de dos años, lo que indica una elevada recurrencia. Esto es coherente con la observación de que los cambios en las coberturas forestales, cuando se transforman en pastizales o herbazales, también alteran el régimen de incendios, asemejándose al de una sabana, donde los incendios son recurrentes (Rodríguez-Trejo, 2014).

Por otro lado, se observó que los ejidos que implementan manejo forestal tienden a enfrentar menos problemas relacionados con incendios. Esto sugiere que mantienen selvas relativamente conservadas que almacenan

combustibles pesados y húmedos, lo que dificulta la propagación del fuego (Gutiérrez-Martínez *et al.*, 2018; Briones-Herrera *et al.*, 2019). Además, el manejo forestal fomenta la organización social para la prevención y control de incendios (Pérez-Verdín *et al.*, 2013).

Este análisis de caso se centró en una subregión con condiciones ambientales específicas de clima cálido subhúmedo y vegetación de selvas, que ha sido escasamente estudiada, a pesar de las crecientes amenazas de incendios. No obstante, el método propuesto puede aplicarse a otras condiciones ambientales. Se espera que este trabajo contribuya al manejo integral del fuego, la conservación de áreas forestales y el mantenimiento de regímenes de incendios, tal como lo proponen Cochrane y Ryan (2009) y Jardel *et al.* (2014).

Finalmente, la asociación con los rasgos culturales y productivos de los ejidos se fundamentó en el conocimiento previo de los autores sobre el área de estudio. Sin embargo, este trabajo abre la necesidad de realizar un análisis detallado sobre las coberturas y usos de suelo asociados a los incendios forestales, así como sobre la severidad y niveles de daño que estos incendios provocan en los ecosistemas. Estos estudios complementarios proporcionarían información valiosa sobre la ecología del fuego en la región y en este tipo de ecosistemas, que aún carecen de datos.

Conclusiones

El Índice Espaciotemporal de Incendios Forestales es una herramienta que permite analizar los rasgos del régimen de incendios en pequeñas unidades espaciales, como son los ejidos. Su aplicación evidencia patrones y una comprensión detallada de la dinámica de incendios forestales a escalas local y regional. El análisis de los indicadores de extensión, frecuencia, recurrencia y estacionalidad reveló la existencia de conglomerados de ejidos que enfrentan problemas graves relacionados con incendios. Estas áreas críticas, especialmente aquellas asociadas con actividades agropecuarias, se caracterizan por la invasión de especies inflamables, lo que incrementa el riesgo de incendios recurrentes.

Un hallazgo clave es que los ejidos con un manejo forestal adecuado presentan bajos niveles de IETIF, sugiriendo que estas prácticas promueven

la conservación de ecosistemas y reducen la propagación del fuego. Esto subraya la importancia de implementar estrategias de manejo del fuego que consideren las características socioeconómicas y ambientales de cada ejido.

Las técnicas aplicadas ofrecen una herramienta valiosa para la planificación y gestión de incendios forestales, resaltando la necesidad de acciones coordinadas entre los ejidos, los gobiernos locales y la comunidad en general para abordar esta problemática de manera efectiva. La identificación de áreas críticas y la promoción de una cultura de manejo del fuego son pasos esenciales hacia la mitigación de los incendios forestales y la conservación de los ecosistemas de la región.

Referencias

- Briones-Herrera, C. I., Vega-Nieva, D. J., Monjarás-Vega, N. A., Briseño-Reyes, J., López-Serrano, P. M., Corral-Rivas, J. J., Alvarado-Celestino, E., Arellano-Pérez, S., Álvarez-González, J. G., Ruiz-González, A. D., Jolly, W. M. & Parks, S. A. (2020). Near real-time automated early mapping of the perimeter of large forest fires from the aggregation of VIIRS and MODIS active fires in Mexico. *Remote Sensing*, 12(2061), 1-19. <https://doi.org/10.3390/rs12122061>
- Carrillo-García, R. L. C., Rodríguez-Trejo, D. A., Tchikoué, H., Monterroso-Rivas, A. I. & Santillán-Pérez, J. (2012). Análisis espacial de peligro de incendios forestales en Puebla, México. *Interciencia*, 37(9), 678-683. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33925502012>
- Chuvieco, E. (2009). Detección y análisis de incendios forestales desde satélites de teledetección. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 103(1), 173-181. <https://rac.es/ficheros/doc/00917.pdf>
- Chuvieco, E., Mouillot, F., van der Werf, G. R., San Miguel, J., Tanase, M., Koutsias, N., García, M., Yebra, M., Padilla, M., Gitas, I., Heil, A., Hawbaker, T. J. & Giglio, L. (2019). Historical background and current developments for mapping burned area from satellite earth observation. *Remote Sensing of Environment*, 225, 45-64. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.013>
- Cochrane, M. A. (2009). Tropical Fire Ecology. Climate change, land use, and ecosystem dynamics. *Springer-Praxis*. 645.
- Cochrane, M. A. & Ryan, K. C. (2009). Fire and fire ecology: Concepts and principles. En: Cochrane M. A. (2009). Tropical Fire Ecology. Climate change, land use, and ecosystem dynamics. *Springer-Praxis*, 25-62.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [Conabio] (2015). *Áreas de importancia para la conservación de las aves, 2015, escala: 1:250000*. Sección Mexicana del Consejo Internacional para la Preservación de las Aves-Conabio. <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/aicas15gw.html>

- Comisión Nacional Forestal [Conafor] (2020). Programa de Manejo del Fuego 2020-2024. Coordinación General de Conservación y Restauración-Gerencia de Manejo del Fuego. <https://snif.cnf.gob.mx/incendios/>
- Da Silva, J. J. A., Pacheco, A. d. P., Ruiz-Armenteros, A. M., Henriques, R. F. F. (2023). Evaluation of the Ability of *SLSTR* (Sentinel-3B) and MODIS (Terra) Images to Detect Burned Areas Using Spatial Temporal Attributes and *SVM* Classification. *Forests*, 14(32), 1-23. <https://doi.org/10.3390/f14010032>
- Díaz-Delgado, D. & Ruíz-Ramos, J. (2019). La teledetección en la caracterización del régimen de incendios y de los efectos sobre la vegetación. En F. García-Novo, M. Casal, & J. G. Pausas (eds.), *Ecología de la regeneración de zonas incendiadas* (pp. 131-146). Academia de Ciencias Sociales y del Medio Ambiente de Andalucía – ACSYMA. <https://oro.open.ac.uk/59612/7/59612.pdf>
- Díaz-Gallegos, J. R., Mas, J. F. & Velázquez-Montes, A. (2008). Monitoreo de los patrones de deforestación en el Corredor Biológico Mesoamericano, México. *Interciencia*, 33(12), 882-890. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33913804>
- Flores-Garnica, J. G. & Flores-Rodríguez, A. G. (2020). Análisis comparativo del número e intervalos de clases de riesgo de incendios forestales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(62), 4-30. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i62.775>
- Flores Garnica, J. G. (2021). Antecedentes y perspectivas de la investigación en incendios forestales en el INIFAP. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, Especial-1. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12iEspecial-1.981>
- Flores-Garnica, J. G., Reyes-Alvarado, A. G. & Reyes-Cárdenas, O. (2021). Relación espaciotemporal de puntos de calor con superficies agropecuarias y forestales en San Luis Potosí, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(64): 127-145. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i64.857>
- Gutiérrez-Martínez, G., Orozco-Hernández, M. E., Ordóñez-Díaz, J. A. B. & Camacho-Sanabria, J. M. (2018). Régimen y distribución de los incendios forestales en el Estado de México (2000 a 2011). *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(29), 92-107. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v6i29.219>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi] (2018). *Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación escala 1:250 000, Serie VII. Conjunto Nacional*. Inegi. <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/#Descargas>
- Jardel, E. J., Pérez-Salicrup, D., Alvarado, E. & Morfín-Ríos, J. E. (2014). Principios y criterios para el manejo del fuego en ecosistemas forestales: guía de campo. Comisión Nacional Forestal, 59. <https://www.gob.mx/publicaciones/es/articulos/principios-y-criterios-para-el-manejo-del-fuego-en-ecosistemas-forestales-guia-de-campo?idiom=es>
- Lim, Ch. H., Kim, Y. S., Won, M., Kim, S. J. & Lee, W. K. (2019). Can satellite-based data substitute for surveyed data to predict the spatial probability of forest fire? A geostatistical approach to forest fire in the Republic of Korea. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 10(1), 719-739. <https://doi.org/10.1080/19475705.2018.1543210>
- Manzo-Delgado, L. L. & López-García, J. (2020). Análisis espacial y temporal de áreas quemadas en 1998, 2003 y 2015 en la Reserva de la Biosfera Montes Azules, Chiapas, México. *Bosque*, 41(1), 11-24. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002020000100011>

- Murthy, K. K., Sinha, S. K., Kaul, R. & Vaidyanathan, S. (2019). A fine-scale state-space model to understand drivers of forest fires in the Himalayan foothills. *Forest Ecology and Management*, 432, 902–911. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.10.009>
- Neger, C., León-Cruz, J. F., Galicia-Sarmiento, L., & Manzo-Delgado, L. L. (2022). Dinámica espaciotemporal, causas y efectos de los megaincendios forestales en México. *Madera y Bosques*, 28(2), 1-21. <https://doi.org/myb.2022.2822453>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (2021). Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020-Informe principal. <https://doi.org/10.4060/ca9825es>
- Pérez-Verdín, G., Márquez-Linares, M. A., Cortés-Ortiz, A. & Salmerón-Macías, M. (2013). Análisis espacio-temporal de la ocurrencia de incendios forestales en Durango, México. *Madera y Bosques*, 19(2). <https://doi.org/10.21829/myb.2013.192339>
- Pompa-García, M., Camarero, J., Rodríguez-Trejo, D. A. & Vega-Nieva, D. J. (2018a). Drought and spatiotemporal variability of forest fires across Mexico. *Chinese Geographical Science*, 28(1). <https://doi.org/10.1007/s11769-017-0928-0>
- Pompa-García, M., Vázquez-Vázquez, L., Zapata-Molina, M., & Solís-Moreno, R. (2018b). Modelo conceptual del potencial de incendios forestales en Durango: avances preliminares. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(13). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v3i13.492>
- Priego, S. A. G, Bocco, G., Mendoza, M. & Garrido, A. (2010). Propuesta para la generación semiautomatizada de unidades de paisaje. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Instituto Nacional de Ecología-Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental-Universidad Nacional Autónoma de México. <https://doi.org/10.22201/ciga.9789688179239p.2011>
- Registro Agrario Nacional [RAN] (2017). Datos geográficos perimetrales de los núcleos agrarios certificados por estado. <https://datos.gob.mx/busca/dataset/datos-geograficos-perimetrales-de-los-nucleos-agrarios-certificados-por-estado>
- Reyes-Bueno, F., y Balcázar-Gallegos, C. (2021). Factores que inciden en la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales en Ecuador. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 11(1), 50–60. <https://doi.org/10.29166/revfig.v11i1.2634>
- Ríos-Quiroz, D. del C., Castillo-Santiago, M. A., Guízar-Vázquez, F. y Medina-Sanson, L. (2021). Historia y cambios en el paisaje en dos ejidos de la Selva Lacandona, Chiapas. *Cuadernos Geográficos*, 60(2), 236–254. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v60i2.15813>
- Rodríguez-Trejo, D. A. (2008). Fire regimes, fire ecology and fire management in Mexico. *AMBIO*, 37(7), 548-556. <http://dx.doi.org/10.1579/0044-7447-37.7.548>
- Rodríguez-Trejo, D. A. (2014). Incendios de vegetación-Su ecología, manejo e historia. Colegio de Postgraduados, Universidad Autónoma Chapingo, Semarnat, Programa de Prevención y Combate de Incendios Forestales, Conafor, Conanp, Parque Nacional Iztacchuatl-Popocatepetl, ANCF, AMPF.
- Tyukavina A., Potapov, P., Hansen, M. C., Pickens, A. H., Stehman, S. V., Turubanova, S., Parker, D., Zalles, V., Lima, A., Kommareddy, I., Song, X-P, Wang, L. & Harris, N. (2022) Global trends of forest loss due to fire from 2001 to 2019. *Frontiers in Remote Sensing*, 3(825190), 1-20. <https://doi.org/10.3389/frsen.2022.825190>

- van Wees, D., van der Werf, G. R., Randerson, J. T., Andela, N., Chen, Y., and Morton, D. C. (2021). The role of fire in global forest loss dynamics. *Global Change Biology*, 27(11), 2377–2391. <https://doi.org/10.1111/gcb.15591>.
- Vilchis-Francés, A. Y., Díaz-Delgado, C., Magaña-Lona, D., Bâ, K. M., & Gómez-Albores, M. Á. (2015). Modelado espacial para peligro de incendios forestales con predicción diaria en la cuenca del río Balsas. *Agrociencia*, 49(7), 803-820. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952015000700008&lng=es&tlng=es.
- Villar-Hernández, B. J., Pérez-Elizalde, S., Rodríguez-Trejo, D. A., & Pérez-Rodríguez, P. (2022). Análisis espaciotemporal de la ocurrencia de incendios forestales en el estado mexicano de Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(74): 120-144. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i74.1274>
- Zamudio, D. A. C., Guerra, B. R., Vázquez, J. L. A., Garnica, J. G. F., Avilés, L. C., Aguilar, R. T., Cantú, D. H. N., Bautista, A. A., Hernández, J. M., Quiroz, D. C., Nava, N. T., & Hernández, R. G. (2023). Trends in global and Mexico research in wildfires: A bibliometric perspective. *Open Journal of Forestry*, 13, 182-199. <https://doi.org/10.4236/ojf.2023.132012>
- Zúñiga-Vásquez, J. M., Cisneros-González, D., Pompa-García, M., Rodríguez-Trejo, D. A., y Pérez-Verdín, G. (2017). Modelación espacial de incendios forestales en México: una integración de dos fuentes de datos. *Bosque*, 38(3), 563-574. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002017000300014>