



Impacto del fuego en el Parque Nacional Cañón del Sumidero, México: cartografía de su probabilidad de ocurrencia

Fire impact in Cañón del Sumidero National Park, Mexico: Cartography of its occurrence probability

Josué Alexis Clemente-Quezada¹, Michelle Farfán^{2*}, Roberto Horacio Albores-Arzate¹ y Roberto Moreno-Ceballo¹

¹ Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas.
Facultad de Ingeniería. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas,
México.

² Universidad de Guanajuato. División de Ingenierías.
Departamento de Ingeniería Geomática e Hidráulica.
Guanajuato, Guanajuato, México.

* Autora de correspondencia.
michelle.farfán@ugto.mx

RESUMEN

Los incendios forestales, ya sean de origen natural o antropogénico, son un fenómeno disruptivo que afecta a diversos ecosistemas forestales tanto en México como en el mundo. Su incidencia ha ido en aumento, principalmente debido a las complejas interacciones entre el uso del suelo y el cambio climático. Este incremento se traduce en una mayor frecuencia, intensidad y extensión de áreas quemadas, lo que provoca pérdidas económicas, aumenta la vulnerabilidad social y contribuye a la degradación ambiental. Por lo tanto, es fundamental identificar las zonas con mayor riesgo de incendios forestales, especialmente en áreas destinadas a la conservación. En este contexto, el estudio se centró en el desarrollo de un modelo de probabilidad espacialmente explícito empleando el método de los pesos de evidencia y un conjunto de variables socioambientales, para el Parque Nacional Cañón del Sumidero (PNCS), una región de gran valor turístico y biodiversidad en el estado de Chiapas, México. Para evaluar el modelo, se comparó con los incendios ocurridos en 2009 utilizando la prueba ROC, obteniendo valores de área bajo la curva aceptables entre 0.66 y 0.70. El tipo de vegetación con mayor probabilidad de sufrir incendios forestales fue la selva baja caducifolia, con un promedio de 161 ha por año quemadas en el período de 2016 a 2021. Finalmente, el mapa de probabilidad se clasificó en cuatro categorías de riesgo: bajo, medio, alto y muy alto. Esta cartografía es esencial para gestionar integralmente el riesgo de incendios forestales en el PNCS.

PALABRAS CLAVE: antrópicas, área natural protegida, incendios forestales, modelo espacial, pesos de evidencia, riesgo, variables.

ABSTRACT

Forest fires, whether of natural or anthropogenic origin, are a disruptive phenomenon that affects various forest ecosystems in Mexico and around the world. Their incidence has been increasing, primarily due to the complex interactions between land use and climate change. This rise translates into greater frequency, intensity, and extent of burned areas, leading to economic losses, increased social vulnerability, and environmental degradation. Therefore, it is crucial to identify areas at higher risk of wildfires, particularly in conservation zones. In this context, the study focused on developing a spatially explicit probability model using the weights of evidence method and a set of socio-environmental variables for the Sumidero Canyon National Park (CSNP), a region of significant tourist value and biodiversity in Chiapas, Mexico. The model was evaluated using the ROC test by comparing it with wildfires that occurred in 2009, achieving acceptable area-under-the-curve values between 0.66 and 0.70. The vegetation type with the highest probability of experiencing wildfires was the low deciduous forest, with an average of 161 hectares burned annually between 2016 and 2021. Finally, the probability map was classified into four risk categories: (1) low; (2) medium; (3) high; and (4) very high. This mapping is fundamental for integrated risk management in the face of the forest fire problem in the CSNP.

KEYWORDS: anthropic, protected natural area, forest fires, spatial model, weights of evidence, risk, variables.

INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales desempeñan un papel crucial en los ecosistemas adaptados al fuego, actuando como un agente de regeneración y renovación ecológica. Pausas y Keeley (2019) destacan que estos ecosistemas han evolucionado para coexistir con los incendios, beneficiándose de procesos como la germinación de semillas y la regeneración de nutrientes en el suelo. Sin embargo, el fuego también puede tener efectos negativos en diversos ecosistemas que no están adaptados, causando pérdida de biodiversidad, degradación del suelo y alteraciones en el ciclo hidrológico. Esto constituye una problemática socioambiental con impactos negativos múltiples en un contexto de calentamiento global (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPCC, por sus siglas en inglés], 2021). En este sentido, aumentan las emisiones de gases de efecto invernadero, mientras que a escala regional afectan las reservas de biomasa, la salud humana y la biodiversidad (Villar-Hernández et al., 2022). En los últimos años, los incendios se han convertido en una amenaza importante para los ecosistemas forestales, aumentando en frecuencia, tamaño y severidad. Las causas de estos incendios en América Latina se asocian a la dinámica de cambio de uso de suelo (Durán et al., 2023) que, en conjunto con el calentamiento global, acentúan las sequías y los procesos de desertificación (Torres-Rojo, 2020; Calán Osejos 2022). Dicho contexto ha incrementado de manera significativa el gasto gubernamental en materia de extinción de incendios a escala mundial (Reyes-Bueno y Balcazar-Gallegos, 2021). En México, esta problemática no es la excepción, los incendios forestales ocurren en los meses de enero a julio, con mayor incidencia en los meses de abril y mayo debido a que son los meses más secos y con mayor temperatura del periodo de estiaje (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [Semarnat], 2023). Se estima que 99% de estos incendios son causados por actividades humanas, principalmente relacionadas con el uso del fuego en las actividades de agricultura y ganadería (Martínez Torres y Pérez Salicrup, 2018; Comisión Nacional Forestal [Conafor], 2022). Para abordar esta problemática de origen mayormente antropogénico, se han desarrollado modelos de predicción de incendios forestales

que emplean diversos enfoques, incluyendo el uso de percepción remota para generar índices de peligrosidad (Chuvieco et al., 2007; Carrillo García et al., 2012; Mamani Choque, 2018), análisis multicriterio a través de sistemas de información geográfica (Moraga Peralta, 2010; Suryabhagavan et al., 2016), modelos de probabilidad mediante el uso de regresión logística (León Rojas, 2014), análisis de estacionalidad y autocorrelación temporal (Pérez-Verdín et al., 2013). Pero existen pocos estudios de modelación espacial explícita para la predicción de la ocurrencia de incendios forestales en México con una perspectiva antrópica (González Gutiérrez et al., 2023). Algunos ejemplos son la investigación realizada por (Ibarra-Montoya y Huerta-Martínez, 2016) para el Bosque La Primavera, en Jalisco, el de Farfán Gutiérrez et al. (2018) para la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca; y el de Farfán Gutiérrez et al. (2020) para el estado de Guanajuato. Sin embargo, resulta necesario desarrollar este tipo de modelos para otras partes del país, a una escala local, más aún para un país donde 99% de los incendios son causados por las actividades humanas (Conafor, 2022).

Chiapas es uno de los estados con mayor cubierta forestal en México, con 4 199 189 ha, que representan 57% de la superficie estatal (Conafor, 2021). Sin embargo, esta vegetación se ve amenazada por el uso del fuego asociado a las labores agropecuarias en combinación con la sensibilidad de sus ecosistemas a este tipo de disturbio. De acuerdo con la Conafor (2021), 38.2% de los ecosistemas en el estado de Chiapas son sensibles al fuego, mientras que 18.8% está adaptado. En el año 2022 se registraron 373 incendios afectando 70 487 ha. Estas cifras colocan a Chiapas como el quinto estado con más incendios a escala nacional (Secretaría de Protección Civil, 2023).

El Parque Nacional Cañón del Sumidero (PNCS), una de las reservas naturales más importantes de Chiapas, enfrenta diversos tipos de presiones entre las que se encuentra el acelerado crecimiento poblacional de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez. Por otra parte, dentro de las actividades humanas causantes de incendios forestales están la quema de basura, la cacería ilegal, la extracción de especies maderables y no maderables, así como las quemas



agropecuarias (Méndez Barrera, 2021). Los impactos de estos fuegos sin control van desde alteraciones en las propiedades del suelo y el régimen de lluvia, hasta modificaciones en los hábitats y en la distribución de la flora y fauna del lugar (Méndez Barrera, 2019).

La identificación de las zonas con mayor riesgo de incendios forestales permitirá implementar medidas de prevención física y cultural para fortalecer la gobernanza en el manejo del fuego y así preservar la valiosa biodiversidad del área protegida.

OBJETIVOS

El objetivo principal de esta investigación fue estimar y evaluar la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales en el área natural protegida del PNCS mediante un modelo espacialmente explícito basado en el método de los pesos de evidencia, integrando variables antrópicas. Como objetivo particular y para alcanzar el objetivo principal, se analizaron las probabilidades de transición de Markov de las áreas quemadas entre 2016 y 2021, en relación con los usos de suelo y los tipos de vegetación forestal presentes en la zona.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El PNCS, decretado el 08 de diciembre de 1980 en el Diario oficial de la Federación (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas [Conanp], 2012), se encuentra ubicado en los límites de dos zonas fisiográficas: la depresión por donde nace el río Grijalva y la altiplanicie de Chiapas; también limita con las montañas del norte en el estado de Chiapas, entre los municipios de Tuxtla Gutiérrez, Chiapa de Corzo, San Fernando, Osumacinta y Soyaló. Está situado en las coordenadas geográficas 16° 44' 00" latitud norte, 93° 00' y 93° 11' de longitud oeste, y tiene una superficie de 21 789 ha (Méndez Barrera, 2019) (Fig. 1). Cuenta con intrincadas condiciones geomorfológicas que provocan singularidades de clima y topografía que se reflejan en la diversidad de flora y fauna silvestre. El listado florístico incluye 68 especies de plantas vasculares, de las

cuales nueve están amenazadas, dos en peligro de extinción y siete son de distribución endémica para México. En total, 11 se encuentran bajo alguna categoría de riesgo según la NOM-059-SEMARNAT-2001 (Méndez Barrera, 2021).

De acuerdo con la Conafor (2021), en el PNCS, aproximadamente 48% de los ecosistemas son sensibles al fuego, cubriendo una superficie de 10 533 ha, mientras que los ecosistemas adaptados al fuego ocupan una porción menor a 4%, abarcando 946.76 ha. El resto de la superficie del área de estudio corresponde a uso de suelo agrícola, urbano y áreas de pastizales con una superficie de 10 414.71 ha (48%).

La época con mayor ocurrencia de incendios forestales inicia en el mes de diciembre, incrementándose en el mes de abril y mayo. En el mes de junio, se reducen debido a que inicia la época de lluvias.

Insumos cartográficos para la calibración del modelo de riesgo

Variables ambientales y antrópicas

Para este estudio se consideró la influencia de once variables cartográficas, que han sido empleadas en otros estudios de modelación espacial explícita de probabilidad de ocurrencia de incendios forestales en México y en Brasil (Farfán Gutiérrez et al., 2018; Sahagún et al., 2022; Silvestrini et al., 2011). A continuación, se presentan: 1) elevación; (2) orientación; (3) pendiente; (4) vegetación forestal; (5) distancia a vías de comunicación; (6) distancia a tierras agrícolas; (7) distancia a pastizales; (8) distancia de localidades urbanas; (9) distancia de ejidos; (10) densidad de población y (11) distancia a áreas quemadas (Tabla 1).

Se emplearon mapas de vegetación y uso del suelo de 2016 y 2022 a escala 1:50 000, elaborados por el Sistema Satelital de Monitoreo Forestal (Samof). Cabe destacar que se utilizó el método de clasificación visual interdependiente propuesto por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO] (1996) para actualizar la capa de uso del suelo y vegetación para el año 2022. Para ello, se emplearon dos imágenes satelitales del sensor SENTINEL 2A de la Agencia Espacial Europea

(ESA) del mes de marzo. Los usos del suelo seleccionados fueron tierras agrícolas y pastizales inducidos, y se calcularon las distancias euclidianas a cada uno de ellos utilizando el programa de acceso gratuito DINAMICA EGO (Soares-Filho et al., 2002). También se calcularon las distancias a caminos, brechas, veredas y asentamientos urbanos a partir de los mapas de vías obtenidos del Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica de Chiapas (Ceieg). Los datos de densidad poblacional se obtuvieron a partir de la capa del censo de población y vivienda del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi), se

empleó el método de la distancia inversa ponderada (IDW) con un radio variable, una distancia máxima de 10 km y una potencia de 2. Finalmente, se generó el mapa de exposición y pendiente del terreno a partir del modelo digital de elevación (MDE) obtenido de la plataforma del Ceieg. Todas las variables se estandarizaron al sistema de referencia de coordenadas WGS 84, con proyección geográfica UTM para la Zona 15 Norte en formato ráster, con un tamaño de píxel de 15 metros, y se procesaron en el programa de acceso gratuito QGIS 3.22.14.

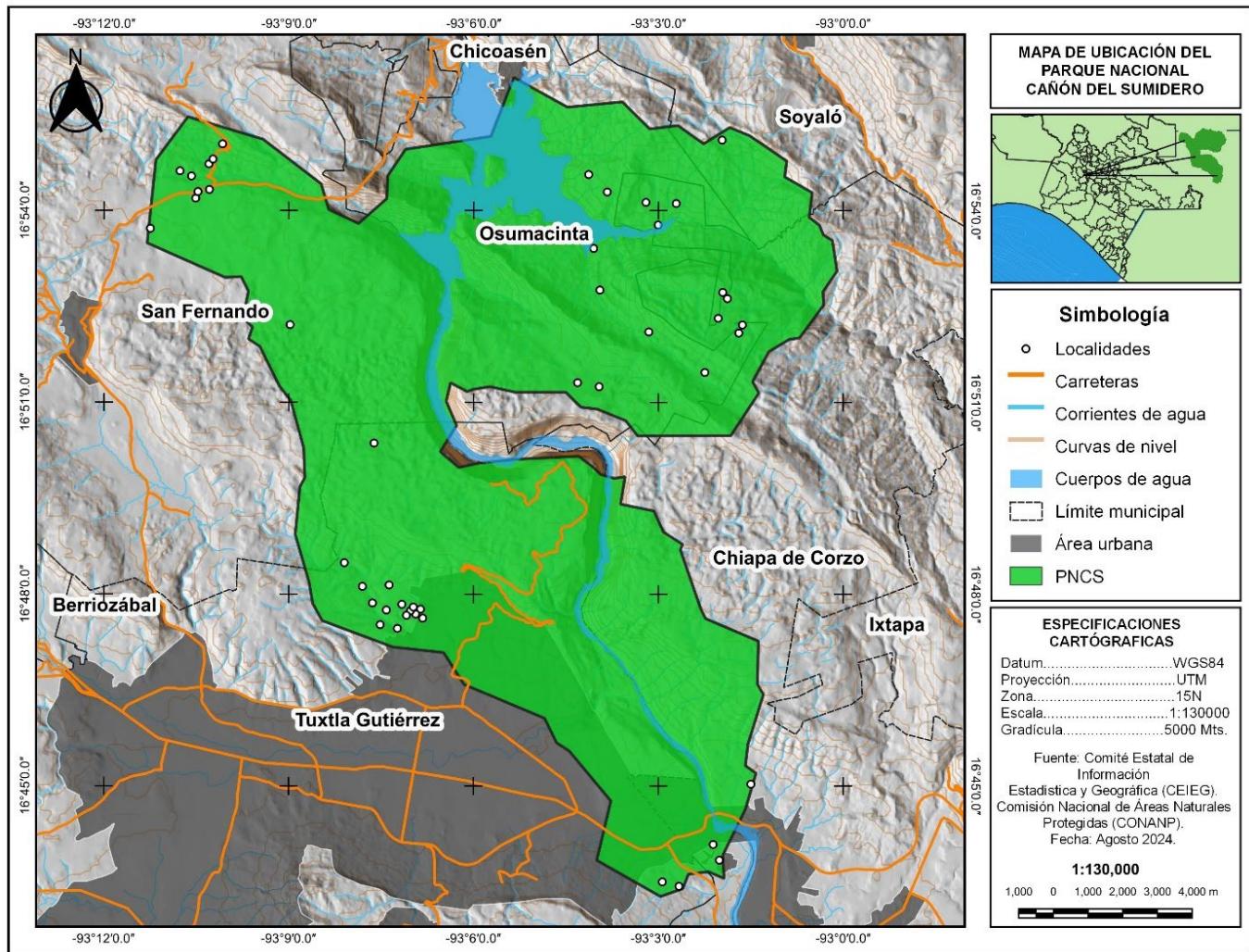


FIGURA 1. Ubicación del Parque Nacional Cañón del Sumidero, Chiapas, México.

Elaboración propia con datos del Comité Estatal de Información de Estadística y Geográfica (Ceieg).



Tabla 1. Variables integradas en el modelo de probabilidad de ocurrencia de incendios forestales en el Parque Nacional Cañón del Sumidero, con resolución espacial de 15 metros.

Insumo cartográfico	Fuente
Áreas quemadas 2009, 2016, 2020, 2021	Elaboración propia con base de imágenes Sentinel 2
Modelo digital de elevación (MDE)	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi, 2013)
Orientación	Elaboración propia con base en MDE
Pendiente	Elaboración propia con base en MDE
Vegetación forestal 2016 y 2022.	Elaboración propia, producto derivado del mapa de uso de suelo y vegetación (Samof, 2016).
Distancia a vías de comunicación	Elaboración propia con base en el mapa de carreteras (Ceieg, 2020)
Distancia a tierras agrícolas	Elaboración propia con base en Mapa de uso de suelo y vegetación (Samof, 2016).
Distancia a pastizales	Elaboración propia con base en mapa de uso de suelo y vegetación (Samof, 2016).
Distancia a localidades urbanas	Elaboración propia con base en el mapa de ejidos (Ceieg, 2020).
Distancia de ejidos	Elaboración propia con base en el mapa de localidades urbanas (Ceieg, 2020).
Densidad de población	Elaboración propia con base en el censo población y vivienda (Inegi, 2020).

Registro histórico de incendios ocurridos en el área de estudio

La Conanp cuenta con un registro histórico a partir del 2003 y hasta el 2022 en el área de estudio. De acuerdo con dicha base de datos, se han presentado un total de 281 incendios, con un promedio anual de 14 incendios por año en los meses de enero a mayo, con una superficie total siniestrada de 3443 ha, con un promedio anual de 172 ha afectadas (Tabla 2) (Conanp, 2023).

Para poder validar estos datos se emplearon imágenes del producto de área quemada de Sentinel 2A con una resolución espacial de 10 m y 20 m, descargadas del EO Browser Sentinel Hub (Sinergise, 2017), para el periodo de análisis del 2016 al 2022. Para poder determinar el impacto de los incendios en la vegetación forestal se empleó la cartografía de vegetación y uso del suelo del año 2022 a escala 1:50 000, elaborados por el Sistema Nacional de Monitoreo Forestal (Samof).

Finalmente, las áreas quemadas obtenidas fueron comparadas con los datos registrados por la Conanp, con el objetivo de analizar su correspondencia y relación. Para lograr esta comparación, se implementó la prueba

estadística de ANOVA. Esta prueba permite realizar un análisis de la varianza para contrastar la hipótesis nula (H_0), que sostiene que las medias de ambas variables son iguales; frente a la hipótesis alternativa (H_A), que sugiere que al menos una de las medias es diferente a las demás en cuanto a su valor esperado (Menéndez y Jamed, 2023).

$$H_0: \alpha_1 - \alpha_2 = \dots = \alpha_l = 0$$

$$H_A: \text{Al menos } \alpha_i \neq \text{ para } i = 1, 2, l$$

Este contraste es fundamental en el análisis de resultados experimentales, en los que interesa comparar los resultados de N 'factores' con respecto a la variable dependiente o de interés y un estudio del coeficiente de correlación que es un índice que mide el grado de covariación entre distintas variables relacionadas linealmente.

Calibración del modelo de probabilidad de ocurrencia de incendios forestales

Para calibrar el modelo, se empleó la cartografía de las áreas quemadas generada del año 2016, con una superficie quemada total de 1858 ha. Este año se designó como el

tiempo 1 (t_1) para que existiera una proximidad temporal con la capa de vegetación y uso del suelo del año 2016, descargada de la página de Samof (2020). Posteriormente se utilizó la cartografía de áreas quemadas de los años 2020 y 2021, que se unió con la capa de vegetación y uso del suelo

del año 2022, a lo que se designó como el tiempo 2 (t_2); esto debido a que fueron dos años con una superficie afectada elevada, de acuerdo con los datos proporcionados por la Conanp.

TABLA 2. Incidencias de incendios forestales dentro del Parque Nacional Cañón del Sumidero.

Año	Tipo de vegetación	No. de incendios forestales	Tipo	Superficie (ha)
2003	Selva baja caducifolia y selva mediana subcaducifolia	7	Superficial	147
2004	Selva baja caducifolia	14	Superficial	98
2005	Selva baja caducifolia	12	Superficial	32
2006	Selva baja caducifolia y selva mediana subcaducifolia	13	Superficial	197
2007	Selva baja caducifolia y selva mediana subcaducifolia	17	Superficial	277
2008	Selva baja caducifolia	12	Superficial	75
2009	Selva baja caducifolia	36	Superficial	108
2010	Selva baja caducifolia y selva mediana subcaducifolia	25	Superficial	46.5
2011	Selva baja caducifolia y selva mediana subcaducifolia	20	Mixto	85.2
2012	Selva baja caducifolia y selva mediana subcaducifolia	6	Superficial	33
2013	Selva baja caducifolia y selva mediana subcaducifolia	12	Mixto	128
2014	Selva baja caducifolia	9	Superficial	48.5
2015	Selva baja caducifolia	15	Superficial	85
2016	Selva baja caducifolia y selva mediana subcaducifolia	20	Mixto	450.9
2017	Selva baja caducifolia	9	Superficial	82
2018	Selva baja caducifolia y selva mediana subcaducifolia	6	Superficial	197
2019	Selva baja caducifolia y selva mediana subcaducifolia	14	Mixto	401.4
2020	Selva baja caducifolia y selva mediana subcaducifolia	10	Mixto	272.8
2021	Selva baja caducifolia y selva mediana subcaducifolia	11	Mixto	408.46
2022	Selva baja caducifolia y selva mediana subcaducifolia	13	Mixto	270.669

Fuente de datos: Conanp.



Los pesos de evidencia se calcularon mediante el método bayesiano de probabilidad condicional (Soares Filho et al., 2009). Se denomina probabilidad condicional a la probabilidad de que un suceso se cumpla habiéndose cumplido uno previo (Mas y Flamenco, 2011). Los pesos de evidencia representan la influencia de cada una de las variables en la probabilidad espacial de ocurrencia de una transición (Soares Filho et al., 2009). El peso positivo de evidencia, $w+$, asociado a la presencia de la condición considerada, se calcula según la ecuación:

$$w+ = \ln\left(\frac{P(C/D)}{P(C/\neg D)}\right)$$

donde:

$w+$ = peso de evidencia

$P(C/D)$ = probabilidad de ocurrencia del evento C, dado un patrón espacial D

$P(C|\neg D)$ = probabilidad de que ocurra el evento C, dado que no esté presente el evento D

Cuando la presencia de la condición tiende a aumentar la probabilidad del evento, el valor del peso es positivo ($w+$); cuando la tendencia es opuesta, este valor es negativo ($w-$) (Soares Filho et al., 2009). El cálculo de la probabilidad condicional puede resultar sencillo tomando en cuenta varias condiciones, ya que se suman los pesos de evidencia. Para esto, es necesario que previamente se calcule el supuesto de independencia condicional entre las variables (López Alegría et al., 2018), determinado a través del grado de correlación entre las variables como posibles detonantes de la probabilidad de ocurrencia de incendios. Para evaluar la correlación espacial, se calculó el coeficiente de Cramer (Bonham-Carter, 1994), el cual varía entre cero y uno. Cero indica variables totalmente independientes y uno, totalmente correlacionadas; si el índice es mayor a 0.45 significa que hay suficiente correlación entre ambas variables, por lo que una de ellas debe descartarse (Soares Filho et al., 2009).

El mapa de probabilidad estimado posteriormente se clasificó en las siguientes categorías de riesgo, utilizando el método de rupturas naturales: (1) bajo; (2) medio; (3) alto; y (4) muy alto.

Evaluación de la probabilidad a la ocurrencia de incendios forestales con el estadístico de la curva ROC

El mapa resultante fue evaluado mediante el análisis de las características operativas del receptor (ROC) en el software DINAMICA EGO, en concordancia con el enfoque metodológico propuesto por Mas et al. (2013) que menciona que el análisis ROC es un método cuantitativo ampliamente utilizado para medir la eficacia de los mapas de probabilidad de ocurrencia, al evaluar el rendimiento de métodos de clasificación binaria con valores continuos o por rangos. Un resultado aceptable presenta valores entre 0.6 y 1 (Farfán Gutiérrez et al., 2020; Mas et al., 2013) trazando los cambios en las tasas de predicción positiva verdadera versus tasas de predicción de falsos positivos. La curva ROC pasa por el punto de (0,1) donde el área bajo la curva (AUC) = 1 representa una sensibilidad total (100%) (sin falsos negativos; la proporción de igniciones se predice correctamente) y 100% de especificidad (sin falsos positivos; la proporción de no incendios se predijo correctamente) (Jaafari et al., 2017). Los resultados en una curva ROC se pueden interpretar de esta forma: si el modelo tiene resultados que están por debajo del valor de la diagonal de 0.5, representa un modelo fallido y es peor que el azar; de 0.6 a 0.7 indican que el modelo tiene una capacidad moderada de predicción; de 0.7 a 0.8 indican una buena capacidad del modelo; si los resultados van de 0.8 a 0.9, el modelo tiene muy buena capacidad de predicción; y si son de 0.9 a 1, el modelo tiene una excelente capacidad predictiva (Farfán Gutiérrez et al., 2020; Milanović et al., 2023). La tasa de éxito de una curva ROC indica qué tan bien el modelo predice la probabilidad de ocurrencia de incendios al compararla con la ocurrencia del evento (Jaafari et al., 2017). Por tanto, cuanto más alto sea el valor, mejor será el modelo.

Cálculo de la matriz de transición de Markov

Se aplicó el método de cadenas de Markov, siguiendo la metodología de Camacho-Sanabria et al. (2015) para estimar la probabilidad de transición entre las categorías de vegetación forestal y áreas quemadas. Este enfoque, basado en matrices de probabilidad de transición, permite analizar

los cambios del sistema en intervalos discretos, calculando los valores de las variables en función de períodos anteriores y asegurando que la suma de cada columna sea igual a 1. La matriz de Markov se calculó a escala anual y para el periodo 2016-2021 utilizando el software DINAMICA EGO, lo que facilitó una comprensión estructurada y precisa de la dinámica de los cambios espaciales y temporales en el periodo de estudio (Soares Filho et al., 2009). La ecuación que rige el cálculo de la matriz markoviana es la siguiente:

$$P^t = HV^t - H^{-1}$$

donde:

P = matriz de probabilidad de transición original

H = matriz de vectores propios

V = matriz de valores propios

t = número de años correspondiente al periodo de la matriz original

Las tasas de transición calculadas se utilizarán para determinar la cantidad neta de cambios, es decir, el porcentaje o las unidades de área que experimentarán una transición hacia otro estado. Este enfoque analítico proporciona una evaluación cuantitativa fundamental para comprender las dinámicas y cambios en las categorías de vegetación forestal y áreas quemadas a lo largo del periodo de estudio (Soares Filho et al., 2009).

RESULTADOS

Cálculo de las áreas quemadas

Durante el periodo de seis años, entre 2016 y 2021, se registró una superficie quemada de 6369.61 ha. En la figura 2 se presenta la cartografía de áreas quemadas, obtenida a través de imágenes de satélite. Este valor representa 9.23% del área total del Parque Nacional Cañón del Sumidero. La media anual de la superficie afectada se situó en 931 ha. Cabe resaltar que el año 2019 registró la mayor superficie afectada con 2115 ha.

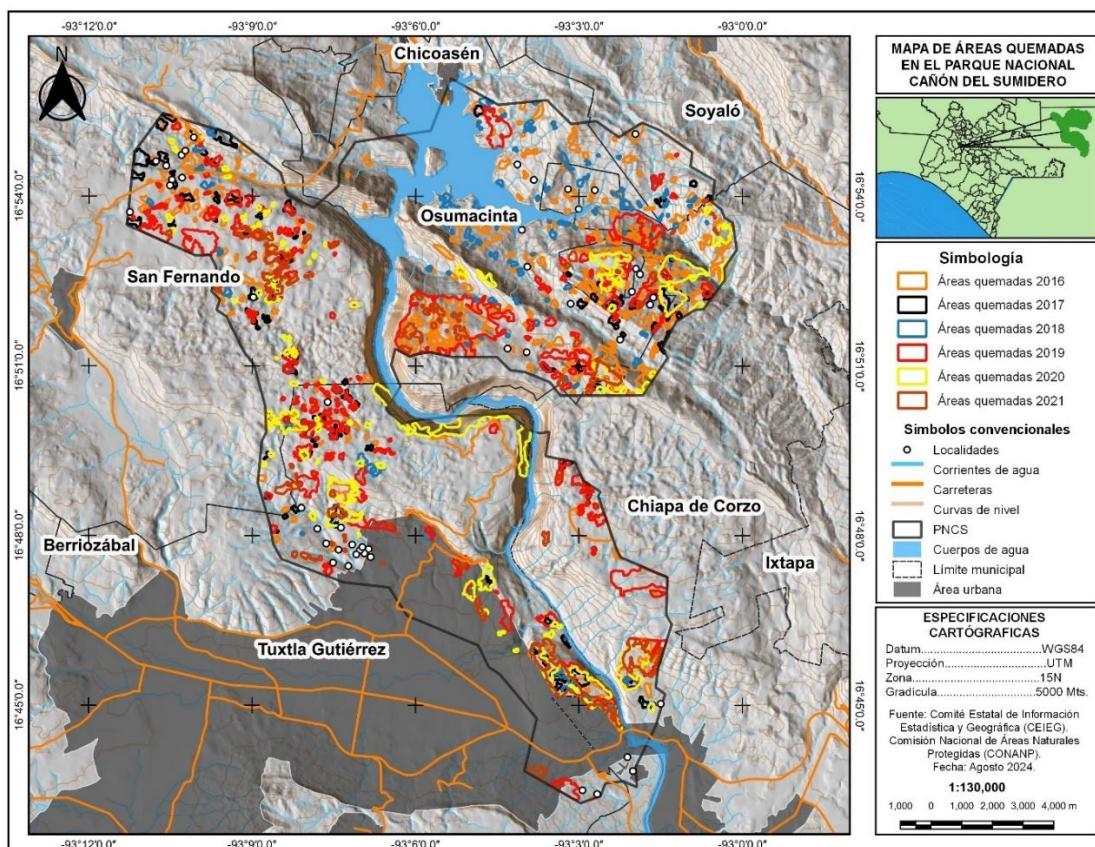


FIGURA 2. Mapa de áreas quemadas del 2016 al 2021 dentro del Parque Nacional Cañón del Sumidero. Elaboración propia con base en imágenes Sentinel-2A y datos de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp).



La cartografía detallada de las áreas quemadas permitió un conteo preciso de las zonas afectadas y un análisis del impacto en diferentes tipos de coberturas forestales, como bosques templados, selvas medianas, selva baja, así como también de los usos de suelo pastizales y tierras agrícolas. Los resultados mostraron que los pastizales fueron los más afectados en 2019 con 845.36 ha, seguidos por las tierras de uso agropecuario. La selva baja caducifolia y los bosques templados registraron la mayor afectación en 2016 con 341.64 ha y 112.23 ha, respectivamente (Fig. 3).

En la figura 4 se presentan, en color azul, las superficies estimadas en este estudio, en comparación con las estimadas por la Conanp, de color naranja. Se observó una diferencia significativa de 4557.11 ha, equivalente a un porcentaje promedio de diferencia de 55.7% entre las áreas registradas y las identificadas mediante el análisis satelital. Este resultado sugiere una subestimación en las superficies registradas por la Conanp. Los resultados obtenidos encuentran respaldo en el análisis de varianza. Según los datos presentados en la tabla 3, se determinó la suma de los cuadrados en el estudio y los grados de libertad.

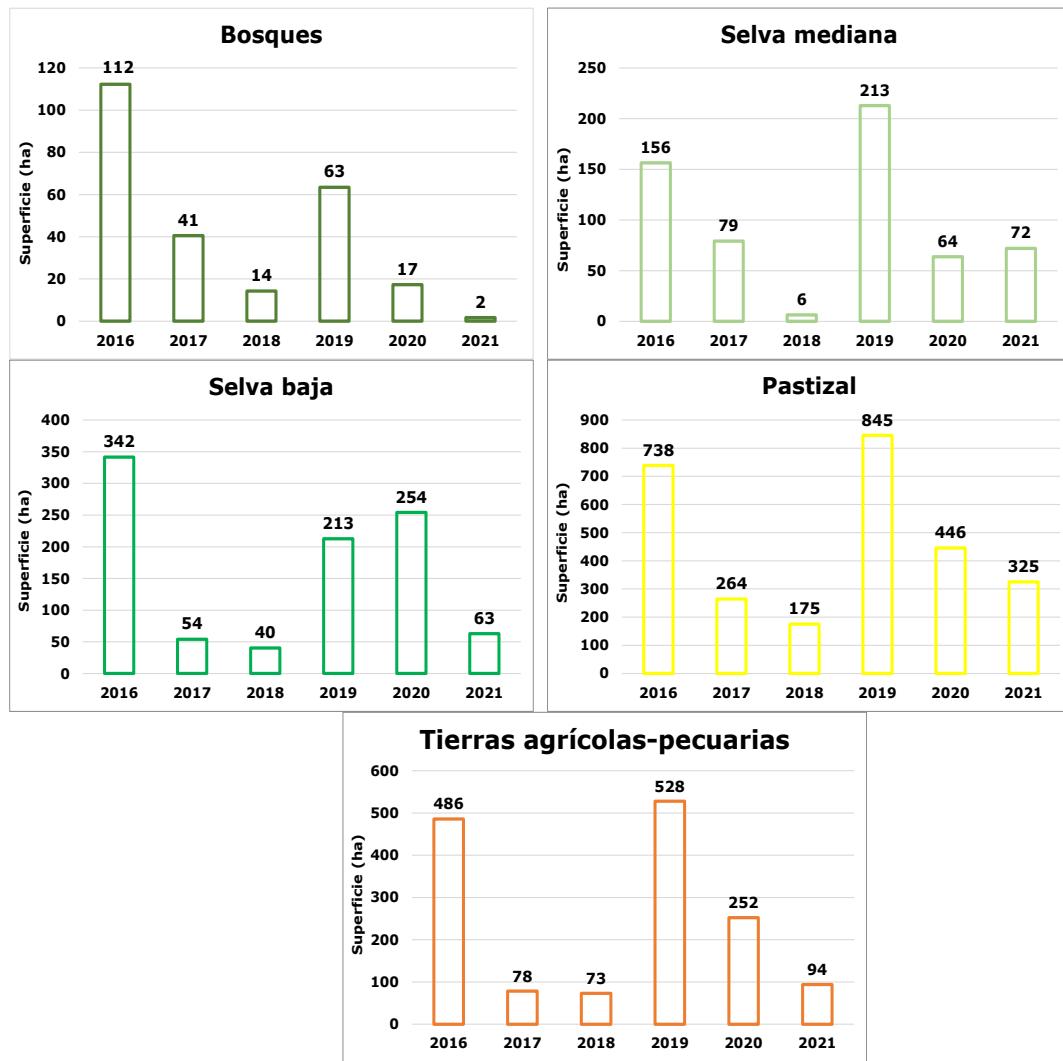


FIGURA 3. Superficie por uso de suelo y cobertura vegetal afectada por incendios forestales, en el periodo 2016-2021 en el Parque Nacional Cañón del Sumidero.

La gráfica correspondiente a uso agropecuario considera también las áreas con uso intencional de fuego.

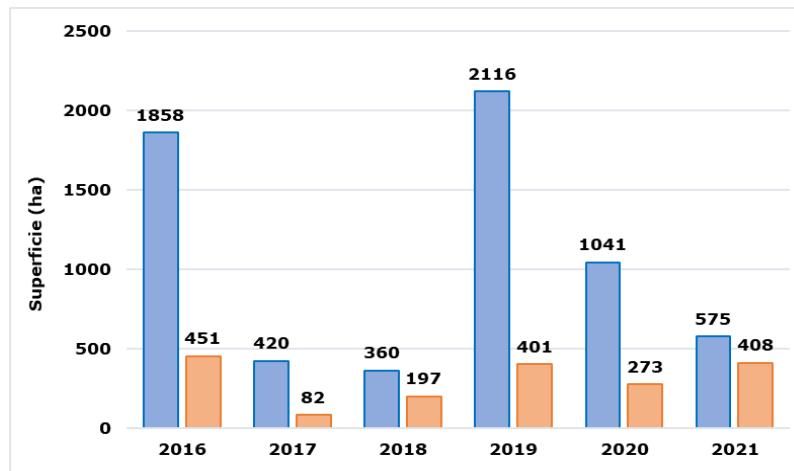


FIGURA 4. Superficies quemadas en el Parque Nacional Cañón del Sumidero durante el periodo 2016-2021.

Columnas azules: resultados de esta investigación; columnas anaranjadas: datos registrados por la Conanp.

Es esencial destacar que el punto crítico de la función es de 4.96, mientras que el valor del punto calculado es de 5.78. Estas cifras permiten verificar las hipótesis previamente formuladas. Además, se ha creado la figura 5 para facilitar la comprensión de los datos relevantes. La interpretación del análisis de varianza, presentado en la tabla 3, indica una diferencia significativa en la variable de área quemada con los datos de la Conanp. Con un Valor P de 0.0369803 y considerando un nivel de significancia de 0.05, se rechaza la hipótesis nula, que sugiere que no hay diferencia significativa entre las superficies quemadas obtenidas. Al examinar la figura 5, se puede decir que el valor encontrado de la función, $F = 5.78538552$, es mayor al punto crítico para (f) = 4.96460274.

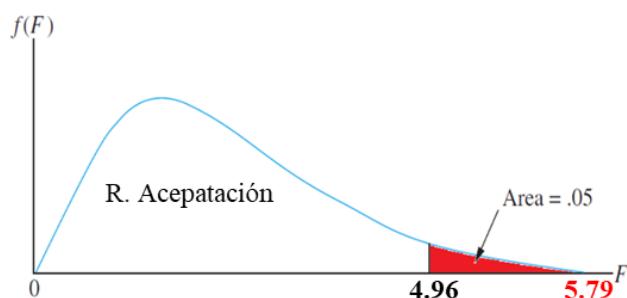


FIGURA 5. Diagrama de prueba de hipótesis.

Matriz de transición

En la figura 6 se presentan las probabilidades anualizadas de transición de Markov de los tipos de vegetación y usos del suelo con respecto a las áreas afectadas por los incendios. Se observa que la transición de tierras agrícolas a áreas quemadas tiene la probabilidad más alta: 0.031. Lo que puede deberse a que los incendios son mayormente originados por el uso del fuego en actividades agropecuarias, especialmente en la preparación de áreas para uso agrícola y la renovación de pastizales en zonas de pastoreo de ganado. También se registró una superficie afectada en los pastizales inducidos, con una probabilidad de transición de 0.02, causada típicamente por incendios en la zona de interfaz urbano-forestal. En cuanto a las selvas bajas y medianas, presentan probabilidades de transición a zonas quemadas de 0.01 y 0.007, respectivamente. Por otro lado, los bosques de pino y encino no muestran afectación por el fuego debido a su ubicación marginal al noreste del cañón y su distancia de las áreas agrícolas y de pastizales.



TABLA 3. Análisis de varianza de las variables de las áreas quemadas, generadas por imágenes de satélite y los datos proporcionados por la Conanp.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1730602	1	1730602	5.78538552	0.0369803	4.96460274
Dentro de los grupos	2991333	10	2991332			
Total	4721935	11				

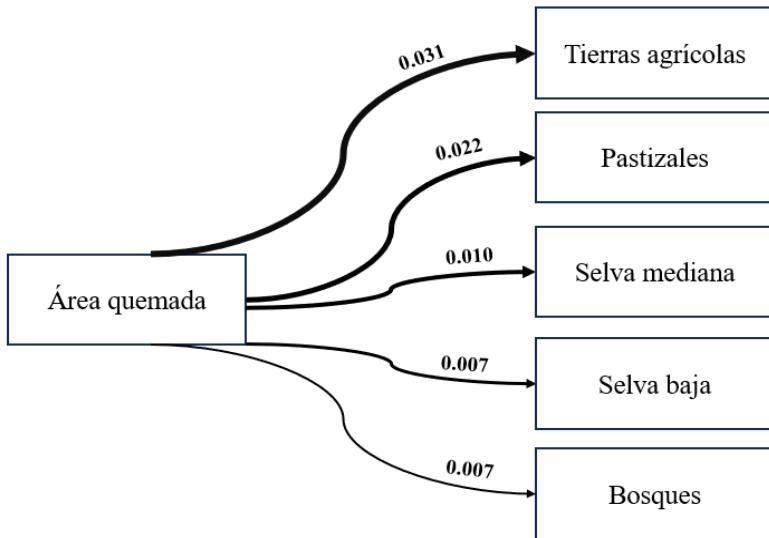


FIGURA 6. Diagrama de flujo que representa las probabilidades de transición de Markov de los diferentes usos de suelo hacia la categoría de áreas quemadas.

Cartografía de probabilidad de ocurrencia de incendios forestales

El mapa de probabilidad de ocurrencias de incendios forestales calculado se muestra en la figura 7. Los tonos rojos representan las probabilidades más altas cercanas a 1 mientras que los valores cercanos a cero se observan en color azul-morado oscuro. Las probabilidades obtenidas se reclasificaron en cuatro categorías de ocurrencia: baja, media, alta y muy alta (Fig. 8). En la tabla 4, se presentan las estimaciones de las superficies respectivas para las categorías de riesgo para este fenómeno perturbador (Tabla 4). Cerca de 23.93 % del PNCS tiene un riesgo muy alto de

ocurrencia de incendios forestales. Este porcentaje de categoría de muy alto riesgo coincide con la vegetación de selva baja caducifolia, así como también la afectación a zonas de pastizales y áreas de uso agrícola. Le sigue la categoría de riesgo medio con un porcentaje de 14.48% con una vegetación predominantemente en zonas de selva baja y mediana, mayormente en la zona central del parque. Por último, las áreas de bajo riesgo abarcan 52.57% principalmente con vegetación de selva baja caducifolia. Por otra parte, las variables con mayor peso de evidencia corresponden a la distancia de tierras agrícolas, distancia de localidades, ejidos y distancia a carreteras.

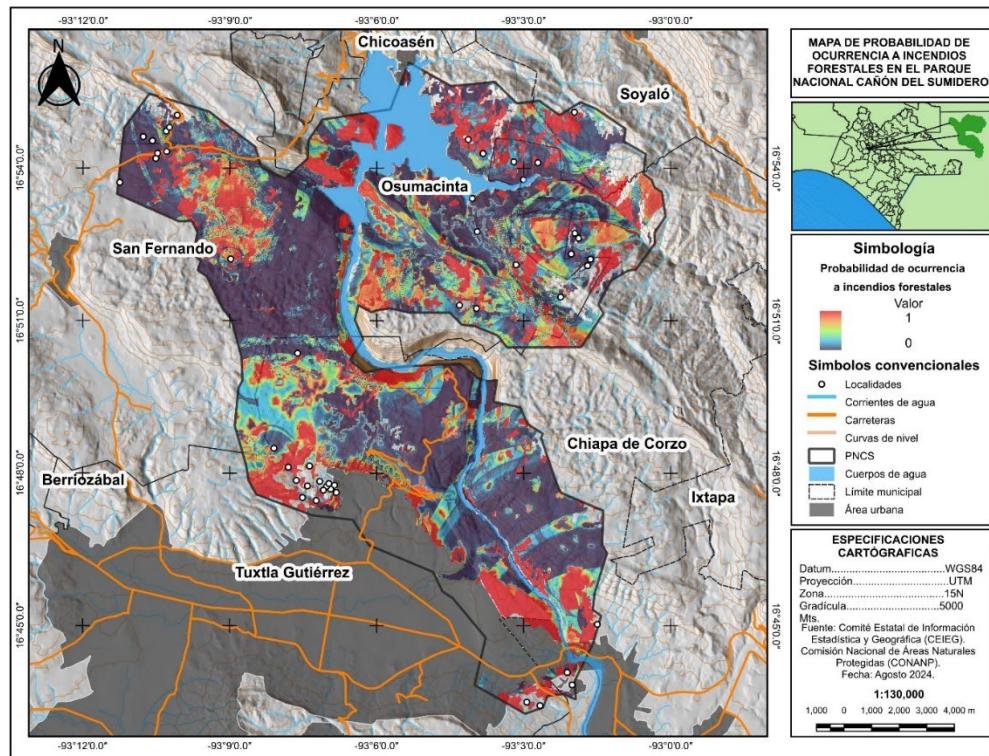


FIGURA 7. Mapa de probabilidad de ocurrencia de incendios forestales para el Parque Nacional Cañón del Sumidero, con base en el análisis espacial de once variables explicativas mediante el método de pesos de evidencia.

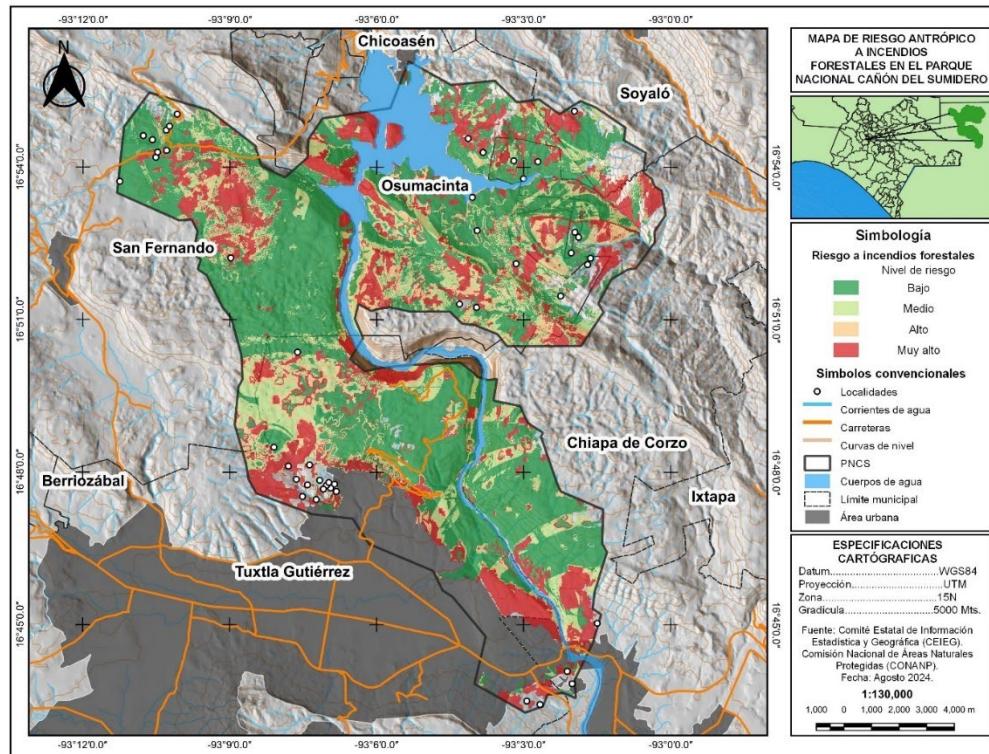


FIGURA 8. Mapa de riesgo de incendios forestales para el Parque Nacional Cañón del Sumidero, clasificado en cuatro categorías (muy alto, alto, medio y bajo), con base en la probabilidad de ocurrencia estimada mediante pesos de evidencia, empleando el método de rupturas naturales (*natural breaks*).



TABLA 4. Categorías de riesgo a incendios forestales y superficies respectivas.

Categoría de riesgo	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
Muy alto	4499.54	23.93
Alto	1696.11	9.02
Medio	2722.28	14.48
Bajo	9884.85	52.57

Evaluación de la probabilidad mediante el estadístico ROC

Se calcularon los valores de la curva ROC para los modelos de probabilidad correspondientes a las distintas coberturas afectadas por incendios forestales. Los resultados de la evaluación de la probabilidad estimada revelaron que la probabilidad de la selva baja caducifolia tuvo un valor de área bajo la curva de 0.66; la selva mediana alcanzó un valor de 0.63, los pastizales mostraron un valor de 0.70, y el uso agrícola obtuvo un valor de 0.68 (Fig. 9).

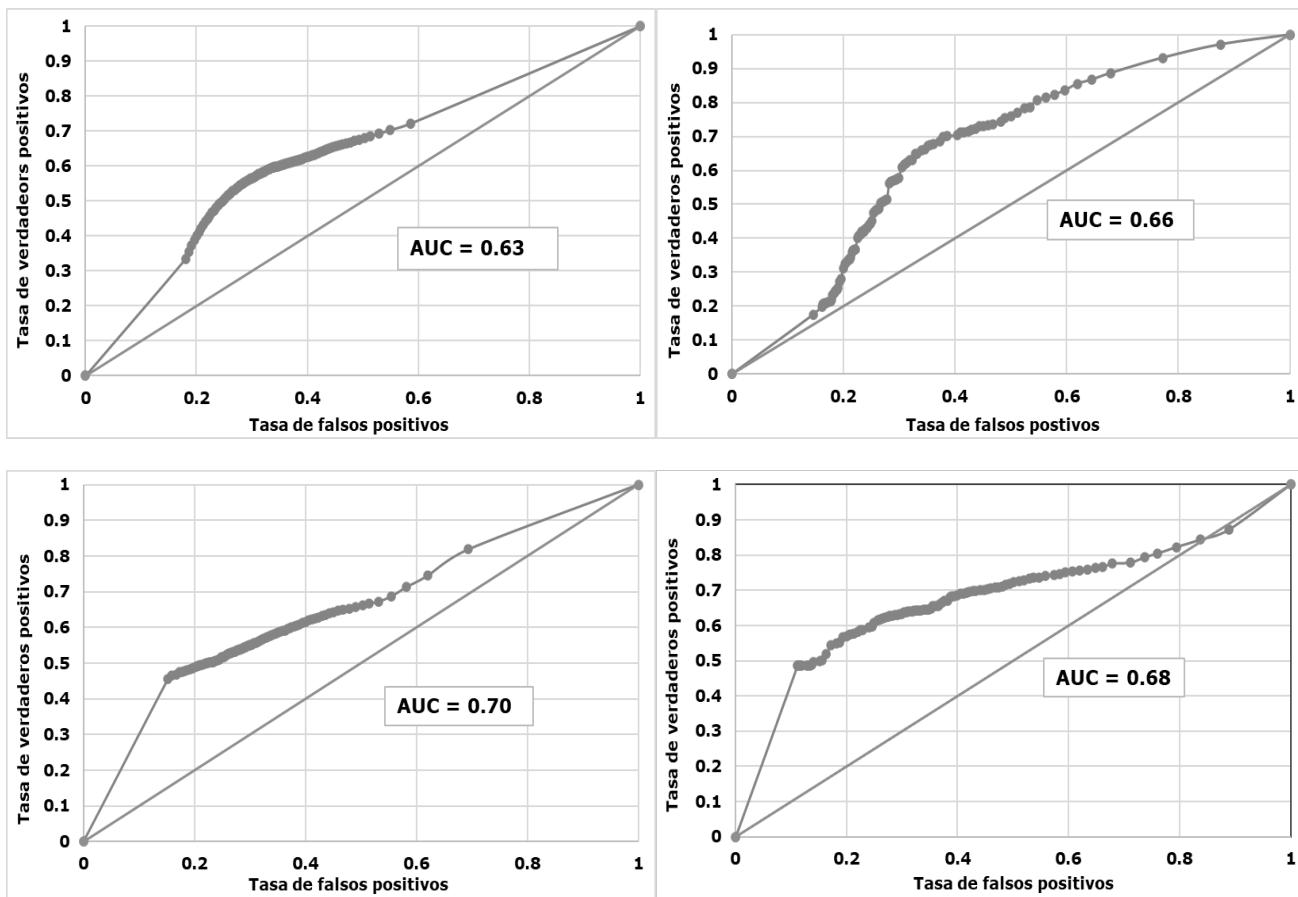


FIGURA 9. Curva de características operativas del receptor (ROC) que muestra el área bajo la curva (AUC) para los bosques y selvas (de izquierda a derecha: selva baja, selva mediana, pastizales y agricultura) de la evaluación del modelo de probabilidad de ocurrencia de incendios forestales para el Parque Nacional Cañón del Sumidero.

DISCUSIÓN

La precisión en la delimitación de las áreas quemadas fue mejorada con el uso de imágenes SENTINEL 2A, que ofrecen un mayor nivel de detalle en comparación con otros sensores como MODIS (Salazar Salazar et al., 2019). El monitoreo de áreas quemadas mediante imágenes de satélite presenta ventajas significativas, como lo demuestran investigaciones realizadas en diferentes contextos geográficos. Tanto el estudio de Ibnousaih (2021), en las Palmas de Gran Canaria, España, como el de Ayala-Carrillo García et al. (2022), en la interfaz urbano-forestal del área metropolitana de Guanajuato, México, destacan el valor de estas imágenes como herramientas cruciales para la identificación, análisis y seguimiento de la evolución de las áreas afectadas por el fuego. Su capacidad para proporcionar una visión global y detallada las convierte en un recurso indispensable para la gestión y el estudio de este fenómeno. Por tanto, se sugiere que instituciones como la Conanp realicen las estimaciones de las áreas quemadas de los incendios forestales atendidos apoyándose en esta importante herramienta. El año 2019 destacó por presentar una significativa superficie afectada por incendios forestales en comparación con las estimaciones realizadas para los años 2017 y 2018, las cuales registraron la menor superficie. Este aumento en superficie quemada se atribuye a una combinación de factores antropogénicos y climáticos. Durante el año 2019, estas incidencias se vieron influenciadas por condiciones climáticas marcadas por la presencia del fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENOS) Niño. Su efecto reduce las precipitaciones, eleva la temperatura y la vegetación está más disponible para arder, por lo que en años Niño, las áreas afectadas por los incendios forestales son de mayor tamaño Farfán et al. (2021).

Al calcular los pesos de evidencia, se identificó que la variable "distancia a zonas de uso agrícola" es una de las más influyentes en el modelo. Este hallazgo coincide con investigaciones previas, como la de Farfán Gutiérrez et al. (2020), que destacan la influencia de la proximidad a áreas agrícolas en la incidencia de incendios forestales. En este contexto, los resultados sobre área quemada muestran que una proporción significativa de las superficies afectadas está

relacionada con prácticas de quema en parcelas agrícolas y pecuarias. Tanto la Conafor (2021) como la Secretaría de Protección Civil (2023) señalan en sus informes estadísticos que estas prácticas son un factor recurrente en la ocurrencia de incendios forestales, particularmente en actividades como la preparación de terrenos para cultivo y la renovación de pastizales. Además, el análisis de la matriz de transición de Markov reveló que la probabilidad más alta corresponde al cambio de tierras agrícolas a áreas quemadas, con un valor de 0.031. Esto refuerza la evidencia de que el uso del fuego en actividades agropecuarias desempeña un papel determinante en la generación de incendios, contribuyendo significativamente a las áreas afectadas.

Asimismo, estudios previos, como el de Milanović et al. (2023) en el Voivodato de Baja Silesia, han demostrado una fuerte relación entre las actividades humanas, particularmente la proximidad a tierras agrícolas y vías de comunicación, y la ocurrencia de incendios forestales. De manera similar, Suryabhogavan et al. (2016) encontraron un mayor riesgo de incendios forestales en áreas cercanas a asentamientos con vegetación alterada, como pastizales o matorrales, lo que facilita la propagación del fuego. En México, Sahagún-Sánchez et al. (2021) evaluaron la probabilidad de ocurrencia de incendios en el Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera (LPFFPA) y su área de influencia, identificando que factores como la cercanía a zonas agrícolas, caminos y asentamientos humanos son determinantes para explicar el riesgo de incendios forestales. Estos hallazgos coinciden con los resultados del presente estudio, donde se identificó que la variable *distancia a zonas de uso agrícola* es una de las más influyentes en el modelo de riesgo, destacando así el papel fundamental de las actividades agrícolas en la generación de incendios forestales. Sin embargo, a diferencia de los estudios mencionados, la presente investigación integra un enfoque metodológico más detallado mediante el uso de imágenes Sentinel-2A y la matriz de transición de Markov para un entendimiento más detallado de las transiciones de cambio entre categorías de cobertura y uso de suelo a áreas quemadas y analizar dinámicas espaciales y temporales, un



aspecto que no ha sido ampliamente abordado en estudios anteriores.

En este contexto, el PNCS enfrenta un cambio significativo en el uso del suelo, evidenciado por el crecimiento de áreas urbanas y agrícolas, factores que incrementan considerablemente el riesgo de incendios forestales. Además, las prácticas agropecuarias que usan el fuego no están cumpliendo con la Norma Oficial Mexicana NOM-015 SEMARNAT/AGRICULTURA-2023 (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2023). Por lo que la preparación de terrenos para cultivo y la renovación de pastizales constituyen una causa importante de incendios forestales, como lo menciona Calán Osejos (2022). A pesar de los beneficios tradicionales del uso del fuego, como la fertilización del suelo o la reducción de plagas, y de que estas prácticas minimizan la mano de obra, el uso excesivo e irresponsable del fuego puede contribuir significativamente a la generación de incendios forestales. Los resultados del presente estudio muestran que, a pesar de la existencia de la Norma Oficial Mexicana NOM-015 SEMARNAT/AGRICULTURA-2023 (DOF, 2023), que establece los protocolos y especificaciones técnicas para el uso del fuego en terrenos forestales y agropecuarios, es una norma no observada por los dueños de las parcelas agropecuarias.

Por otra parte, los resultados mostraron que 11.4% equivalente a 2119.25 ha de la vegetación que es sensible al fuego se encuentra en la categoría de alto riesgo a incendios forestales, situación que puede comprometer los servicios ecosistémicos que proveen tanto las selvas bajas como medianas caducifolias (Hamilton, 2008), dando paso a un proceso de sabanización. Lo anterior implica la sustitución de la cobertura forestal por pastizales, principalmente pastos exóticos adaptados al fuego (Myers, 2006).

En este estudio, se empleó un análisis espacialmente explícito con enfoque bayesiano empleando variables cartográficas centradas en un enfoque antrópico como fuentes de ignición. Aunque existen modelos que combinan variables climáticas y de combustible forestal, como se evidencia en estudios previos (Muñoz Robles et al., 2005; Vilchis-Francés et al., 2015; Santiago et al., 2018), es

importante señalar que las actividades humanas se posicionan como la causa principal de los incendios forestales en México. El mapa de riesgo elaborado representa una herramienta fundamental para la gestión y planificación del manejo del fuego en el PNCS. Su utilidad radica en su capacidad para identificar áreas prioritarias de intervención y en su potencial para ser incorporado en los planes de manejo y políticas de conservación. Instituciones como la Conanp podrían apoyarse en esta herramienta para diseñar estrategias efectivas de prevención física y cultural, así como de restauración forestal.

CONCLUSIONES

El presente estudio abordó la dinámica espacial y temporal (2016 - 2021) de la ocurrencia de incendios forestales, así como su probabilidad de ocurrencia en el PNCS. La superficie promedio de área quemada para dicho periodo fue de 1061.60 ha. La dinámica entre usos de suelo, vegetación forestal y áreas quemadas, calculada a través de la matriz de Markov, mostró que las quemas agropecuarias cuando salen de control, se vuelven incendios que afectan a la selva baja caducifolia, una vegetación sensible al fuego con una superficie promedio afectada de 161 ha en el periodo 2016-2021. El modelo de probabilidad espacialmente explícito y su reclasificación permitió identificar cuatro categorías de riesgo de incendios forestales: bajo, medio, alto y muy alto. De la superficie del PNCS, 23.93% se encuentra en la categoría de muy alto riesgo de presentar incendios forestales, esta superficie coindice espacialmente con la distribución de la selva baja caducifolia. La detección de zonas de alto riesgo se atribuye principalmente a la presencia de actividades humanas en áreas cercanas a zonas habitadas y de actividades de uso de suelo agropecuario. Dichas actividades conllevan el uso del fuego para la limpieza de parcelas y, en ocasiones, la gestión inadecuada de residuos sólidos. Se demostró que el modelo de probabilidad a la ocurrencia de incendios forestales para el PNCS es confiable después de ser evaluado con datos independientes a su calibración mediante el uso de la curva ROC.

RECONOCIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt) por el apoyo económico otorgado durante los últimos seis meses del posgrado y a la Conanp por la base de datos compartida para el presente estudio.

REFERENCIAS

- Ayala-Carrillo, M., Farfán, M., Cárdenas-Nielsen, A., & Lemoine-Rodríguez, R. (2022). Are wildfires in the wildland-urban interface increasing temperatures? A land surface temperature assessment in a semi-arid Mexican city. *Land*, 11(12), 2105. <https://doi.org/10.3390/land11122105>
- Bonham-Carter, G. (1994). *Geographic information systems for geoscientists: Modelling with GIS*. Elsevier.
- Calán Osejos, S. D. (2022). *Identificación de zonas con susceptibilidad y amenaza a incendios forestales en la Sierra Norte del Ecuador* [Tesis de licenciatura, Universidad Central del Ecuador].
- Camacho-Sanabria, J. M., Juan-Pérez, J. I., & Pineda-Jaimes, N. B. (2015). Modeling of land use/cover changes: Prospective scenarios in the Estado de Mexico. Case study - Amanalco de Becerra. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 21(2), 203-220. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2014.10.049>
- Carrillo García, R. L., Rodríguez Trejo, D. A., Tchikoué, H., Monterroso Rivas, A. I., & Santillan Pérez, J. (2012). Análisis espacial de peligro de incendios forestales en Puebla, México. *Intervención*, 37(9), 678-683.
- Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica [Ceieg] (2020). *Geoweb Chiapas*. <https://geoweb.chiapas.gob.mx/geoweb/>
- Chuvieco, E., Aguado, I., Yebra, M., Nieto, H., Vilar, L., Martínez-Vega, J., Padrón, D., Martín, S., & Salas, J. (2007). Generación de un modelo de peligro de incendios forestales mediante teledetección y SIG. En R. E. Rivas, A. O. Grisotto, & M. B. Sacido (Eds.), *Teledetección. Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional* (pp. 19-26). Editorial Martín.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas [Conanp] (2012). *Estudio previo justificativo para modificar el decreto del Área Natural Protegida Parque Nacional Cañón del Sumidero, Chiapas*. <https://docplayer.es/40045735-Para-modificar-la-declaratoria-del-area-natural-protegida.html>
- Comisión Nacional Forestal [Conafor] (2021). *Adaptación de ecosistemas al fuego*. https://idefor.cnf.gob.mx/layers/geomnode%3Aadaptacion_de_ecosistemas
- Comisión Nacional Forestal [Conafor] (2022). *Estadísticas de incendios. Sistema Nacional de Información Forestal*. <https://snif.cnf.gob.mx/estadisticas-de-incendios/>
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas [Conanp] (2023). *Programa de manejo del fuego. Parque Nacional Cañón del Sumidero*.
- Diario Oficial de la Federación [DOF] (2023). Norma Oficial Mexicana NOM-015-Semarnat/Agricultura-2023, *Que establece las especificaciones técnicas de métodos de uso del fuego en los terrenos forestales, temporalmente forestales, preferentemente forestales, en los terrenos de uso agropecuario y colindantes*. <https://www.gob.mx/profepa/documentos/norma-oficial-mexicana-nom-015-semarnat-sagarpa-2007>.
- Durán, L.; Villalobos, R.; Ruiz, N., & Carrea, F (Eds.) (2023). *Gobernanza del fuego: Experiencias desde las plataformas de gobernanza de la Red Latinoamericana de Bosques Modelo*. Serie restauración, Turrialba, Costa Rica, CATIE. No. 10. <https://intranet.catie.ac.cr/flipbook/EB051185/go/pdf/Gobernanza-fuego-LDurán>.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO] (1996). *Forest resources assessment 1990: Survey of tropical forest cover and study of change processes*. FAO Forestry paper no.130.
- Farfán Gutiérrez, M., Flamenco Sandoval, A., Rodríguez Padilla, C. R., Rodrigues de Sousa Santos, L., González Gutiérrez, I., & Gao, Y. (2020). Cartografía de la probabilidad de ocurrencia a incendios forestales para el estado de Guanajuato: Una aproximación antrópica de sus fuentes de ignición. *Acta Universitaria*, 30, 1-15. <https://doi.org/10.15174/au.2020.2953>
- Farfán, M., Dominguez, C., Espinoza, A., Jaramillo, A., Alcántara, C., Maldonado, V., Tovar, I., & Flamenco, A. (2021). Forest fire probability under ENSO conditions in a semi-arid region: A case study in Guanajuato. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(10), 684. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09494-0>
- Farfán Gutiérrez, M., Pérez-Salicrup, D. R., Flamenco-Sandoval, A., Nicasio-Arzeta, S., Mas, J.-F., & Ramírez Ramírez, I. (2018). Modeling anthropic factors as drivers of wildfire occurrence at the Monarch Butterfly Biosphere. *Madera y Bosques*, 24(3), e2431591. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2431591>
- González Gutiérrez, I., Farfán Gutiérrez, M., Morales Manilla, L. M., Pérez Salicrup, D. R., Garza Saldaña, J. J., & Medina Puente, A. (2023). Índices y modelos para la predicción de la ocurrencia de incendios forestales: una revisión para México. *Revista Geográfica de América Central*, 2(71), 193–219. <https://doi.org/10.15359/rgac.71-2.7>



- Hamilton, L. S. (2008). *Forests and water: A thematic study prepared in the framework of the global forest resources assessment 2005*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Ibarra-Montoya, J. L., & Huerta-Martínez, F. M. (2016). Modelado espacial de incendios: una herramienta predictiva para el Bosque La Primavera, Jalisco México. *Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 11(1), 35-49. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1536>
- Ibnousaih, S. (2021). *Análisis de incendios forestales a partir de imágenes Sentinel en Las Palmas de Gran Canaria en agosto de 2019*. [Tesis de maestría, Universidad de Jaén].
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi] (2013). *Continuo de elevaciones mexicano y modelos digitales de elevación*. <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi] (2020). *Espacio y datos de México*. <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/default.aspx>
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC] (2021). Summary for Policymakers. En V. Masson Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (Eds.) *Climate Change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press (pp. 3-34). https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SummaryVolume.pdf
- Jaafari, A., Gholami, D. M., & Zenner, E. K. (2017). A Bayesian modeling of wildfire probability in the Zagros Mountains, Iran. *Ecological Informatics*, 39, 32-44. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2017.03.003>
- León Rojas, G. I. (2014). *Evaluación de la susceptibilidad a incendios forestales en San Luis Potosí, México, una contribución a la gestión del riego* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de San Luis Potosí]. <https://repositorioinstitucional.uaslp.mx/xmlui/bitstream/handle/1/3839/MCA1LRG201401.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- López Alegría, A., José Ríos, M., Flamenco Sandoval, A., & Farfán Gutiérrez, M. (2018). Análisis y modelación espacial de los patrones de deforestación (2005-2025) en la microcuenca La Unión del municipio de Chiapa de Corzo, Chiapas. *Sociedad y Ambiente*, 18, 117-143. <https://doi.org/10.31840/sya.v0i18.1878>
- Mamani Choque, S. J. (2018). *Susceptibilidad de incendios en laderas del proyecto Misicuni* [Tesis de maestría no publicada]. Universidad Mayor de San Simón.
- Martínez Torres, H. L., & Pérez Salicrup, D. R. (2018). El papel del campesinado ante la regulación de los incendios forestales en México: Consecuencias inesperadas. *Perspectivas Rurales Nueva Época*, 30. <https://doi.org/10.15359/prne.16-31.5>
- Mas, J., & Flamenco-Sandoval, A. (2011). Modelación de los cambios de coberturas/uso del suelo en una región tropical de México. *GeoTrópico*, 5(1), 1-24.
- Mas, J.-F., Soares Filho, B., Pontius, R. G., Farfán Gutiérrez, M., & Rodrigues, H. (2013). A suite of tools for ROC analysis of spatial models. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2(3), 869–887. <https://doi.org/10.3390/ijgi2030869>
- Méndez Barrera, A. (2019). *Atención de un incendio forestal en el Parque Nacional Cañón del Sumidero de la Región Frontera Sur Istmo y Pacífico Sur, Chiapas (Informe final SNIB-CONABIO, Proyecto No. RR003)*. <http://www.conabio.gob.mx/institucion/proyectos/resultados/InfRR003.pdf>
- Méndez Barrera, A. (2021). *Atención a un incendio forestal en el Parque Nacional Cañón del Sumidero. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Parque Nacional Cañón del Sumidero. Informe final SNIB-CONABIO, proyecto No. TR007*. <http://www.conabio.gob.mx/institucion/proyectos/resultados/InfTR007.pdf>
- Menéndez, E., & Jamed, L. O. (2023). Una propuesta para el cálculo de la potencia en el ANOVA. *Investigación Operacional*, 27(2), 194-205. <https://revistas.uh.cu/invoperacional/article/view/6412>
- Milanović, S., Kaczmarowski, J., Ciesielski, M., Trailović, Z., Mielcarek, M., Szczygiel, R., Kwiatkowski, M., Balazy, R., Zasada, M., & Milanović, S. D. (2023). Modeling and mapping of forest fire occurrence in the Lower Silesian Voivodeship of Poland based on machine learning methods. *Forests*, 14(1), 46. <https://doi.org/10.3390/f14010046>
- Moraga Peralta, J. C. (2010). Evaluación del riesgo ante incendios forestales en la Cuenca del Río Tempisque, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, 2(45), 33-64.
- Muñoz Robles, C. A., Treviño Garza, E. J., Verástegui Chávez, J., Jiménez Pérez, J., & Aguirre Calderón, O. A. (2005). Desarrollo de un modelo espacial para la evaluación del peligro de incendios forestales en la Sierra Madre Oriental de México. *Investigaciones Geográficas*, 26, 101. <https://doi.org/10.14350/ig.30099>
- Myers, R. L. (2006). *Convivir con el fuego—Manteniendo los ecosistemas y los medios de subsistencia mediante el Manejo del Fuego*. TNC. Iniciativa Global para el Manejo del Fuego. https://www.conservationgateway.org/Documents/el_manejo_integral_del_fuego.pdf.

- Pausas, J. G., & Keeley, J. E. (2019). Wildfires as an ecosystem service. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 17(5), 289-295. <https://doi.org/10.1002/fee.2044>
- 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), e1922339. <https://doi.org/10.21829/myb.2013.192339>
- Reyes-Bueno, F., & Balcazar-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>
- Salazar Salazar, D. N., Farfán Gutiérrez, M., & Arellano Reyes, M. A. (2019). Cartografía de la severidad de los incendios forestales (2017, 2018, 2019) en el estado de Guanajuato empleando imágenes Sentinel-2. *Jóvenes en la Ciencia*, 5(1). <http://repositorio.ugto.mx/handle/20.500.12059/3587>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [Semarnat] (2023). *Temporadas de incendios forestales en México*. Semarnat. <http://www.gob.mx/semarnat/articulos/temporadas-de-incendios-forestales-en-mexico>
- Secretaría de Protección Civil (2023). *Programa estatal de Protección Civil para la temporada de estiaje 2023*. https://proteccioncivil.chiapas.gob.mx/programas-especiales/Temporada_Estiaje/2023
- Silvestrini, R. A., Soares-Filho, B. S., Nepstad, D., Coe, M., Rodrigues, H., & Assunção, R. (2011). Simulating fire regimes in the Amazon in response to climate change and deforestation. *Ecological Applications: A publication of the Ecological Society of America*, 21(5), 1573–1590. <https://doi.org/10.1890/10-0827.1>
- Sinergise (2017). *EO Browser. Sentinel Hub*. <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>
- Sistema Nacional de Monitoreo Forestal [Samof] (2020). *Cobertura del suelo*. Comisión Nacional Forestal. <https://snmf.cnf.gob.mx/cobertura-del-suelo/>
- Soares Filho, B. S., Rodrigues, H. O., & Costa, W. L. S. (2009). *Modelamiento de dinámica ambiental con Dinamica EGO* (p. 119). <http://www.csr.ufmg.br/dinamica/>
- Soares-Filho, B. S., Coutinho Cerqueira, G., & Lopes Pennachin, C. (2002). dinamica—a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. *Ecological Modelling*, 154(3), 217–235. [https://doi.org/10.1016/s0304-3800\(02\)00059-5](https://doi.org/10.1016/s0304-3800(02)00059-5)
- Suryabagavan, K., Alemu, M., & Balakrishnan, M. (2016). GIS-Based multicriteria decision analysis approach for forest fire susceptibility mapping: A case study in Harenna Forest, southwestern Ethiopia. *Tropical Ecology*, 57, 33-43.
- Torres-Rojo, J. M. (2020). Índice para la estimación de ocurrencia de incendios forestales en superficies extensas. *Revista Chapino Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 26(3), 433-449. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2019.11.082>
- 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.
- Villar-Hernández, B. de J., Pérez-Elizalde, S., Rodríguez-Trejo, D. A., & Pérez-Rodríguez, P. (2022). Análisis espacio temporal 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>

Manuscrito recibido el 12 de febrero de 2024

Aceptado el 20 de enero de 2025

Publicado el 28 de mayo de 2025

Este documento se debe citar como:

Clemente-Quezada, J. A., Farfán, M., Albores-Arzate, R. H., & Moreno-Ceballo, R. (2025). Impacto del fuego en el Parque Nacional Cañón del Sumidero, México: cartografía de su probabilidad de ocurrencia. *Madera y Bosques*, 31, e312664. <https://doi.org/10.21829/myb.2025.312664>



Madera y Bosques por Instituto de Ecología, A.C. se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercialCompartirIgual 4.0 Internacional.