



DOI: [10.29298/rmcf.v16i90.1523](https://doi.org/10.29298/rmcf.v16i90.1523)

Artículo de investigación

Determinación de áreas de protección prioritaria basada en la densidad *Kernel* de incendios forestales

Defining priority protection areas based on forest fire Kernel density

José Germán Flores Garnica^{1*}, Gabriela Orozco Gutierrez², Gabriela Ramírez Ojeda¹

Fecha de recepción/Reception date: 8 de octubre de 2024.

Fecha de aceptación/Acceptance date: 6 de marzo de 2025.

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Centro Altos de Jalisco. México.

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Tecomán. México.

*Autor para correspondencia; correo-e: flores.german@inifap.gob.mx

*Corresponding author; e-mail: flores.german@inifap.gob.mx

Resumen

Para ubicar áreas donde se deban implementar estrategias de manejo de incendios forestales, sería suficiente localizar aquellas con antecedentes de su ocurrencia; no obstante, dada la naturaleza antropogénica de las causas su localización puede variar. El objetivo de este trabajo fue determinar las variaciones espacio-temporales de la ocurrencia de incendios, a través de la estimación de la densidad *Kernel*, así como de parámetros que la favorecen. Se utilizó información histórica (2016-2023) de incendios forestales en Colima, México. Las áreas con mayor prioridad de protección contra incendios forestales fueron aquellas que tuvieron más densidad de ocurrencia. Se analizó su distanciamiento en relación a parámetros de riesgo: (a) Caminos, (b) Carreteras, (c) Áreas agrícolas, y (d) Pastizales. Los resultados indicaron que la mayoría de los incendios forestales se ubicó en la región oeste del estado, en zonas con vegetación secundaria de selva baja caducifolia. Sin embargo, se registró una variación temporal en la distribución espacial de los incendios; aunque, estuvo condicionada a la cercanía de vías de acceso, principalmente con la proximidad de caminos, con una tendencia negativa ($p < 0.001$). El mayor número de incendios se localizó en un intervalo altitudinal de 0 a 1 650 m; mientras que, en relación a la cercanía de carreteras, la frecuencia más alta se presentó a una altitud de 0 a 820 m. La definición de áreas prioritarias, con base en las densidades de incendio (*Kernel*), permite ubicar y delimitar las áreas por clase de riesgo de incendio.

Palabras clave: Áreas prioritarias, densidad de ocurrencia, distribución espacial, manejo de incendios forestales, parámetros de riesgo, variación espaciotemporal.

Abstract

In order to establish those areas where forest fire management strategies should be implemented, it would be sufficient to identify those areas with a history of forest fires; however, because of the anthropogenic nature of the causes of the fires, the location of the areas may vary from one country to another. The objective of this work was to determine the spatial-temporal variations of fire occurrence through the estimation of the Kernel density

as well as the parameters that favor it. Historical information (2016-2023) on forest fires in *Colima*, Mexico, was used. The areas with the highest priority for protection against forest fires were those with the highest density of occurrence. Their distance was analyzed in relation to risk parameters: (a) Roads, (b) Highways, (c) Agricultural areas, and (d) Grasslands. The results indicated that most of the forest fires were located in the Western region of the state, in areas with secondary vegetation of low deciduous forest. However, there was a temporal variation in the spatial distribution of fires, although it was conditioned by the proximity of access routes, mainly by the proximity of roads, with a negative trend ($p < 0.001$). The highest number of fires was located at an altitudinal range of 0 to 1 650 m; while, in relation to the proximity of roads, the highest frequency occurred at an altitude of 0 to 820 m. The definition of priority areas, based on (Kernel) fire densities, makes it possible to locate and delimit areas by fire risk class.

Keywords: Priority areas, density of occurrence, spatial distribution, forest fire management, risk parameters, spatial-temporal variation.

Introducción

En los incendios, el fuego se considera como un elemento más de los ecosistemas forestales, cuyos impactos se definen con relación a diversos factores, como la severidad del incendio y la susceptibilidad del ecosistema al fuego (Flores-Rodríguez et al., 2020). De esta forma, las repercusiones de la ocurrencia de incendios implican impactos (positivos o negativos) en la dinámica de las poblaciones (Fulé et al., 2002): estructura (Alanís et al., 2018), composición (Bautista & Rodríguez, 2017) y densidad (Díaz-Hernández et al., 2021). Sin embargo, el papel ecológico del fuego depende de cierto régimen natural (Fulé et al., 2011; Jardel et al., 2009) que puede alterarse, si se modifican sus periodos de ocurrencia (Neger, 2021), lo cual se ha estado provocando principalmente por causas antropogénicas (Ávila-Flores et al., 2010).

Al respecto, en México se estima que 97 % de los incendios forestales son consecuencia de actividades humanas (Cruz et al., 2017; Ibarra-Montoya & Huerta-Martínez, 2016), entre las cuales predominan las agrícolas y ganaderas (Flores et al., 2016); por ello es relevante ubicar las áreas con alta incidencia para encaminar estrategias de manejo del fuego (Chávez et al., 2016), el cual está relacionado con: (1) Su uso en actividades humanas y (2) La disponibilidad de información histórica de la ocurrencia de incendios forestales. Lo anterior, permitiría modelar la tendencia

de ocurrencia de incendios (Gollberg et al., 2001), que a su vez apoyaría la ubicación de áreas prioritarias para su prevención.

El riesgo de incendio, probabilidad de que ocurra en un lugar y tiempo determinados, depende de las condiciones que propician su ignición, tales como la cercanía a centros de población, uso del fuego en actividades agropecuarias, cercanía a vías de comunicación y la ocurrencia histórica de incendios (Comisión Nacional Forestal [Conafor], 2024). No obstante, la naturaleza antrópica de las causas implica que estas cambien en su distribución espacial, lo cual define una dinámica para la localización de las áreas donde se presentan los incendios forestales (Ruíz-Corzo et al., 2022). Como resultado de esto, la tendencia social de la ocurrencia de incendios propicia su repetición frecuente en las mismas zonas; y con ello, se definen densidades específicas de la ocurrencia de incendios (Ocampo-Zuleta & Beltrán-Vargas, 2018). Esta variación puede modelarse espacialmente mediante herramientas estadísticas específicas, como máquinas de aprendizaje, regresiones bayesianas, econometría espacial o regresión logística.

Es importante señalar que se debe asegurar que en la modelación se consideren las variaciones antrópicas de las densidades de ocurrencia de los incendios, como es el caso del análisis de densidad *Kernel*. De acuerdo con lo anterior, el objetivo de este trabajo fue determinar las variaciones espacio-temporales de la ocurrencia de incendios, mediante la estimación de la densidad *Kernel*, y analizar las condiciones que los favorecen para, finalmente, definir áreas prioritarias de atención para la prevención de incendios forestales. Para ello, se utilizó información del historial de incendios forestales (2016-2023) en el estado de Colima, México (Conafor, 2024).

Materiales y Métodos

Área de estudio

Los incendios en el estado de Colima han propiciado un desplazamiento de los ecosistemas originales que ha reducido las áreas de producción maderable, y ha favorecido el predominio de la vegetación secundaria (acahuales) donde se quema, principalmente, vegetación herbácea y hojarasca, seguidas de la arbustiva (Conafor 2024). El estado tiene una superficie de 5 627 km²; la vegetación corresponde a pastizales, áreas agrícolas, bosques de pino, encino, pino-encino, encino-pino, bosque mesófilo de montaña, selva baja caducifolia y mediana subcaducifolia, vegetación secundaria arbórea, arbustiva y herbácea (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi], 2018). En cuanto a los incendios, durante el periodo de estudio 2016-2023 se registraron 462 incendios (Cuadro 1), que afectaron una superficie de 26 228.6 ha (Conafor, 2024).

Cuadro1. Número de incendios forestales y superficie afectada, por tipo de cobertura durante el periodo 2016-2023 en Colima, México.

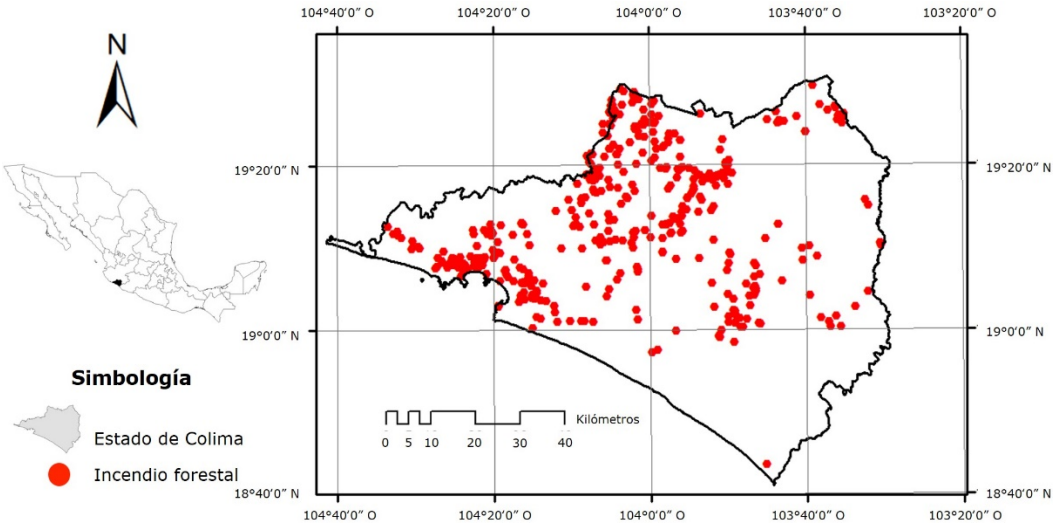
Año	Incendios	Herbáceas	Arbolado	Renuevo	Arbustos	Hojarasca	Superficie total
2016	81	4 295.1	0.0	0.0	1 825.0	0.0	6 120.0
2017	84	1 352.6	1.7	0.0	675.6	0.0	2 029.9
2018	54	1 101.6	0.0	0.0	177.6	0.0	1 279.2
2019	55	1 107.9	0.0	0.0	832.0	3 339.4	5 279.3
2020	33	470.4	220.2	14.0	674.0	2 121.3	3 499.9
2021	38	686.7	0.1	0.0	245.8	1 424.8	2 357.4

2022	49	459.3	280.1	61.8	139.5	1 890.6	2 831.2
2023	68	1 100.6	0.0	25.0	257.4	1 448.7	2 831.7
Total	462	10 574.2	502.1	100.8	4 826.9	10 224.7	26 228.6

Fuente: Conafor (2024).

Descripción de datos

Las causas de los incendios forestales en el estado de Colima ya fueron señaladas y derivan directa o indirectamente de actividades antrópicas. No obstante, se identifican otras como las quemas de basura, fogatas, fumadores, entre otros. En la Figura 1 se muestra la distribución de los incendios a lo largo del territorio estatal en un periodo de 8 años (2016-2023).



Fuente: Conafor (2024).

Figura 1. Distribución espacial de los incendios forestales en el estado de Colima,

durante el periodo 2016-2023.

Las áreas prioritarias de atención para la prevención de incendios forestales se definieron a partir del análisis de las condiciones que favorece la ocurrencia de incendios forestales, las que se especificaron en las siguientes covariables: (a) Caminos de terracería, cuya información se obtuvo de la red nacional de caminos y carreteras del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2022); (b) Carreteras (Inegi, 2022); (c) Áreas agrícolas, con base en la información de la Serie VII de vegetación y uso de suelo de Inegi (2018); y (d) Áreas con pastizales (Serie VII).

Estructura metodológica

En general, para la definición de áreas prioritarias contra incendios forestales se requiere de información de un gran número de variables ambientales, socioeconómicas, culturales, demográficas, etcétera, las cuales condicionan la dinámica de ocurrencia de los incendios. Debido a que no siempre se dispone de esta información, o es difícil obtenerla, la metodología que se propone representa una estrategia alternativa (Figura 2) que se basa en la variación espacial de las densidades de ocurrencia de los incendios forestales por causas antrópicas que se presentan cada año. De esta forma, la perspectiva antropogénica se enfoca en el análisis de proximidad de los incendios con las siguientes variables de riesgo de ocurrencia: caminos, carreteras, áreas agrícolas y áreas con pastizales. Con base en lo anterior, finalmente, se muestran dos enfoques de clasificación de zonas prioritarias: (1) Limitadas en función de los factores de riesgo, y (2) Limitadas con la incorporación del criterio de densidad *Kernel*.

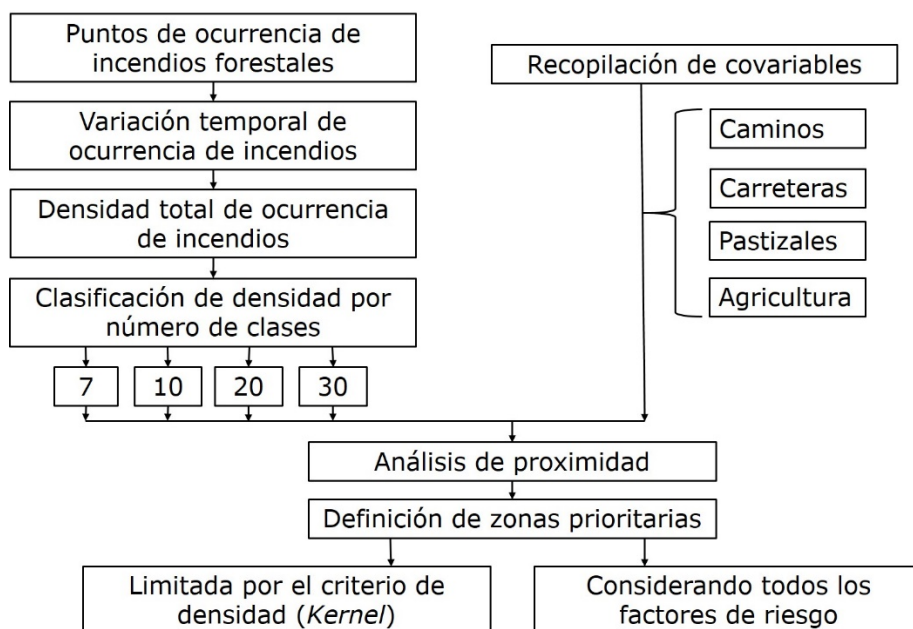


Figura 2. Diagrama de flujo general del proceso metodológico para la clasificación de áreas prioritarias contra incendios forestales.

Análisis estadístico

Densidad *Kernel* de incendios. Para ubicar las áreas de mayor prioridad contra incendios forestales, el criterio principal fue considerar aquellas donde se tuviera una mayor densidad de ocurrencia de incendios, lo cual se determinó a través de la estimación de la densidad *Kernel*. Esta asume que la presencia de un incendio puede representarse como una serie de eventos georreferenciados que ocurren diferencialmente a lo largo de una región particular, lo que determina variaciones espaciales en su densidad (Salvati & Ferrara, 2015). De esta forma, se generó un

mapa de densidades por cada año, mediante la estimación de densidad *Kernel*, que se realizó utilizando cálculos de vecindad local hechos bajo la estructura de una red de celdas, donde el valor de la densidad en un punto dado (celda) se estimó en relación con el número de puntos (celdas) donde se tuvieron registro de un incendio, con esto se definieron densidades superficiales continuas (Fuenzalida et al., 2013).

La estimación de la densidad *Kernel* es una técnica no paramétrica basada en varias funciones: función cuadrática (Silverman, 1986), función uniforme, función de *Epanechnikov*, distribución normal, función triangular, función cuártica, etcétera (Turlach, 1999); en la que los puntos cercanos tienen una mayor influencia en la determinación de la densidad, mientras que los puntos distantes tienen una ponderación menor (Tobler, 1970). Así, el estimador de densidad *Kernel* se define con la Ecuación 1 (Amatulli et al., 2007):

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh^d} \sum_{i=1}^n K \left\{ \frac{x - X_i}{h} \right\} \quad (1)$$

Donde:

n = Número de puntos de observación

h = Ancho de banda

K = Módulo central (*Kernel*)

x = Vector de coordenadas que representa el lugar donde se estima la función

X = Vectores de coordenadas que representan cada punto de observación

d = Número de dimensiones en el espacio

La variación de la densidad de incendios se modeló considerando un radio de búsqueda máximo (ancho de banda) de 9 051 m, que concuerda con la "regla de oro" de Silverman (1986). Aunque no existe un proceso único y universal para definir el

valor de h (ancho de banda) en todos los casos, esta tiende a asegurar un valor de h que permite suavizar la función de densidad resultante, lo que resulta en un equilibrio que evita sobre ajustes o subestimaciones (Flores-Garnica & Macías-Muro, 2018).

Relación con coberturas de suelo. Una vez que se definieron las áreas de acuerdo a su densidad de incendios forestales, se analizó la relación de la ocurrencia con las principales coberturas del suelo que definen el riesgo de incendio, y que se relacionan con actividades humanas productivas: (a) Agricultura, donde se usa el fuego principalmente para eliminar los restos de cosechas para realizar la siembra; (b) Pastizales que son áreas dedicadas principalmente a la ganadería, en las que el fuego se usa para desechar pastos viejos y favorecer el crecimiento de pasto nuevo más palatable (Sánchez-Velásquez & Pineda-López, 2008). Para ello se usó la información vectorial presentada en la Serie VII de Inegi (2018), la cual se presenta a una escala de 1:250 000, con base en la cual se separaron los polígonos donde se practica la agricultura y los pastizales. Posteriormente, se determinaron las frecuencias de las distancias de esos polígonos a los puntos en los que se ubica la presencia de incendios forestales.

Correlación con vías de comunicación. En forma similar al análisis que se hizo para las coberturas de agricultura y pastizales, se realizó uno para el distanciamiento de los incendios forestales con los caminos y las carreteras. Para esto se usó la información de la red nacional de caminos del Inegi (2022), y se consideró que la cercanía a las vías de comunicación es uno de los principales factores de riesgo de incendios forestales.

Resultados y Discusión

Dinámica espacio-temporal de incendios

Durante el periodo de análisis se asumió que las covariables (caminos, carreteras, agricultura y pastizales) usadas eran constantes, y solo se hizo referencia a la dinámica de variación espacial de las densidades de ocurrencia de incendios (Figura 3). En general, la presencia de incendios forestales en Colima, durante el periodo 2016-2023, se orientó hacia la región oeste del estado, donde destacaron dos áreas. La primera se ubicó cerca del puerto de Manzanillo y la segunda en la zona centro del estado. Sin embargo, fue clara la variación espacial; aunque son similares, no se registraron densidades iguales año con año (Galindo et al., 2009). Sobresalió el año 2019, en el cual se tuvo una mayor ocurrencia de incendios, lo que definió una mayor continuidad de las densidades. Por el contrario, durante el año 2022, se observó una baja ocurrencia de incendios, lo que resultó en una zonificación más reducida y localizada (cerca del puerto de Manzanillo). Aunque esto puede ligarse con la ocurrencia de condiciones meteorológicas favorables, como las sequías, en general, la presencia de incendios está más asociada a actividades antropogénicas (Espinoza & Gómez, 2019).

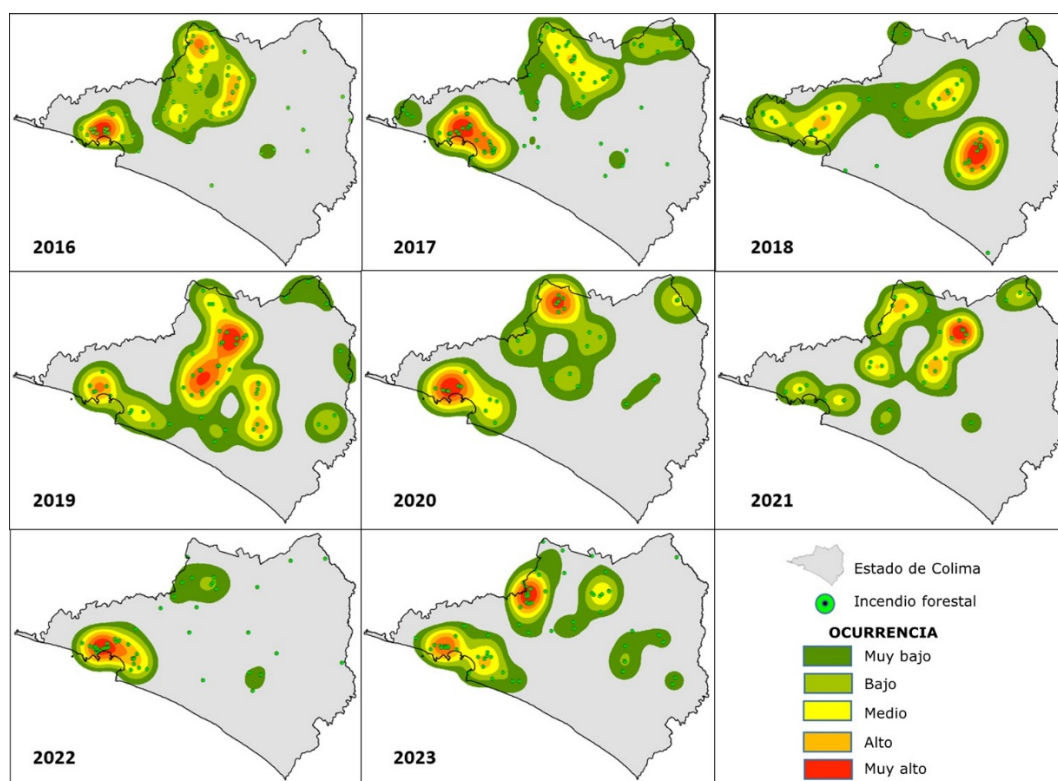


Figura 3. Dinámica temporal de la variación espacial de las densidades de ocurrencia de incendios forestales en el estado de Colima, México.

Los resultados indicaron la existencia de un alto grado de densificación de los incendios forestales, tendencia que se ha documentado en otros estudios, y cuyo patrón espacial presentó una distribución agrupada (Pérez-Verdín et al., 2013; Pompa & Hernández, 2012); es decir, no aleatorio (Ávila-Flores et al., 2010). En la Figura 4 se muestra la densidad de incendios forestales al integrar todos los del periodo 2016-2023, y nuevamente destaca la alta densidad cerca del puerto de Manzanillo, incluso considerando las variaciones espaciales que se originan al usar diferentes números de clases de densidad (Flores-Garnica & Flores-Rodríguez, 2020). Una segunda zona prioritaria se define en la parte centro-oeste del estado. En forma operativa, el número de clases por usar para agrupar la densidad de incendios, se determinará de acuerdo a la disponibilidad de recursos; es decir, si hay suficientes se cubrirá toda la superficie

de riesgo que se define al utilizar 30 clases, por el contrario, si los recursos son limitados es conveniente manejar un menor número de clases de riesgo (Figura 4).

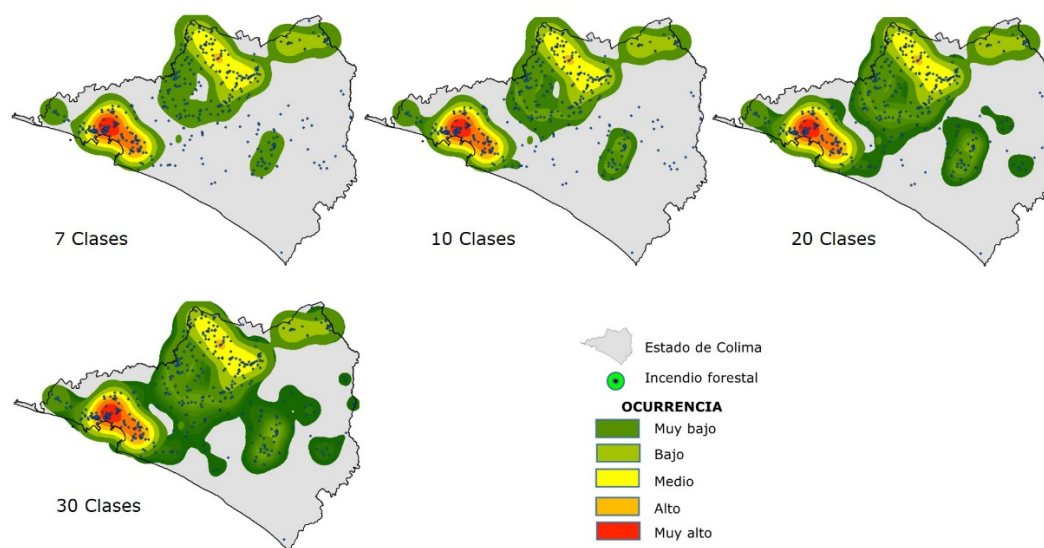
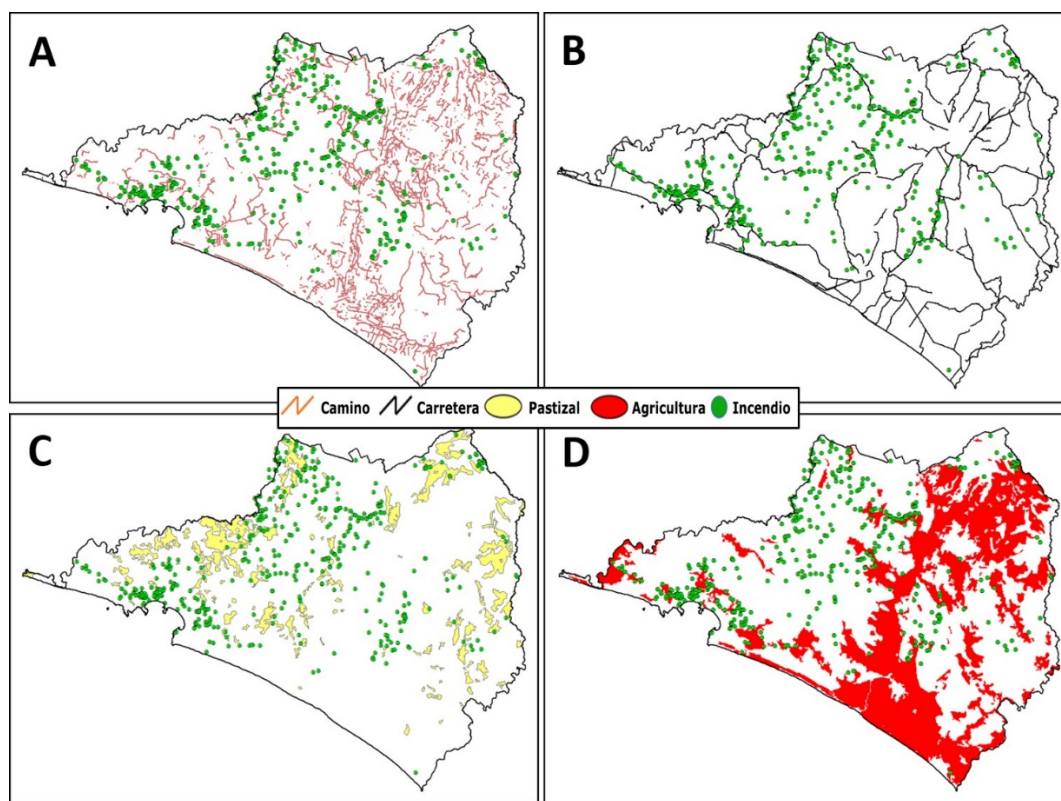


Figura 4. Variaciones de cobertura definidas por el número de clases de la densidad *Kernel* de la ocurrencia de incendios forestales en el estado de Colima, México, durante el periodo 2016-2023.

Análisis de proximidad

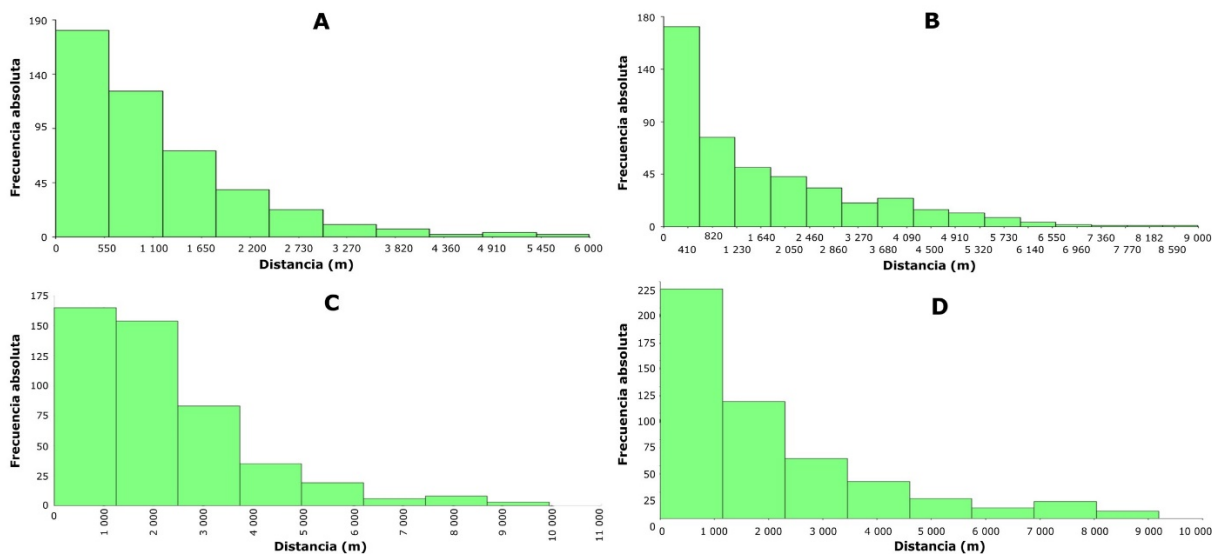
Una vez que se ubicaron y priorizaron las áreas donde ocurren los incendios forestales, se hizo un análisis de su proximidad a los siguientes factores de riesgo (Figura 5): (a) Caminos que dan accesos a las áreas forestales, por lo que favorecen la probabilidad de inicio de un incendio (Pérez-Verdín et al., 2013); (b) Carreteras al igual que los caminos, pero también son frecuentes los incendios por arrojar colillas de cigarros (Moraga, 2010); (c) Pastizales donde se utiliza el fuego para renovar y

hacer más palatable los pastos para el ganado (Galindo et al., 2009); y (d) Agricultura, en cuyo entorno se hace uso del fuego para eliminar los residuos de cosechas, o para apoyar la cosecha de caña de azúcar (Vega & Martínez, 2020). En la Figura 6 se presenta la frecuencia absoluta de la distancia en la que se ubican los incendios forestales, de acuerdo a los factores de riesgo señalados.



A = Caminos; B = Carreteras; C = Pastizales; D = Agricultura.

Figura 5. Ubicación de los incendios forestales ocurridos en el periodo 2016-2023, en relación a diferentes factores de riesgo.



A = Caminos; B = Carreteras; C = Pastizales; D = Agricultura.

Figura 6. Frecuencia absoluta de incendios forestales con relación a la distancia a los factores de riesgo.

En el caso de los caminos se observó que el mayor número de incendios se ubicaron en un intervalo de 0-1 650 m (Cuadro 2), mientras que para las carreteras estuvo entre 0 y 820 m. De acuerdo con esto, la distancia a las vías de acceso es un criterio de importancia para determinar el potencial de riesgo de incendio forestal (Rojas et al., 2022). Por otra parte, aunque se considera que las actividades agrícolas y pecuarias (Barrios-Calderón & Escobar, 2020; Bassaber-Zuñiga et al., 2024) llegan a representar alrededor de 66 % (Galindo et al., 2009) de las causas de incendios, su proximidad a ellos incendios fue, en general, lejana. No obstante, en ambos casos, la mayor frecuencia de incendios se localizó entre 0 y 3 000 m.

Cuadro 2. Porcentaje de frecuencia acumulada de incendios forestales, referidos a diferentes factores de riesgo.

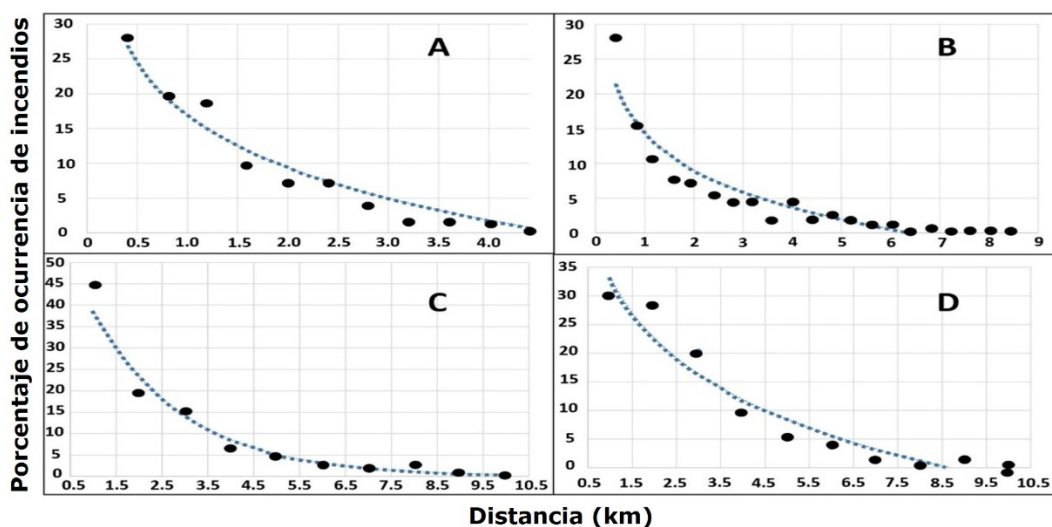
Distancia (m)	% acumulado		Distancia (m)	% acumulado	
	Caminos	Carreteras		Pastizal	Agricultura

400	28.12	28.33	1 000	44.83	29.96
800	47.78	43.76	2 000	64.66	58.19
1 200	66.38	54.33	3 000	80.17	78.45
1 600	76.11	61.95	4 000	86.85	87.93
2 000	83.3	69.13	5 000	91.38	93.32
2 400	90.27	74.63	6 000	94.18	96.98
2 800	94.08	79.07	7 000	96.12	98.06
3 200	95.56	83.72	8 000	98.92	98.28
3 600	97.04	85.62	9 000	99.78	99.57
4 000	98.31	89.85	10 000	100	100
4 400	98.52	91.75			
4 800	98.73	94.29			
5 200	99.15	95.98			
5 600	100	97.25			

Específicamente, alrededor de la mitad de los incendios se ubicaron en un intervalo de distancia de 0 a 800 y 1 200 m, para caminos y carreteras respectivamente. Si se considera que una de las causas principales de los incendios forestales en Colima es la quema de pastizales para el rebrote de pasto tierno, la mayor ocurrencia se registró de 0 a 1 000 m de las zonas de pastizales, distancia que es menor al intervalo de proximidad a las áreas agrícolas (0-2 000 m). Si se consideran tres cuartas partes del porcentaje de frecuencia de incendios forestales, es claro que la proximidad a caminos representa el factor de mayor riesgo, lo cual coincide con Cruz et al. (2017). Por lo que la implementación de actividades preventivas, se debe enfocar a las áreas con máxima densidad de incendio (Rodríguez et al., 2008), en las que se ubique la mayor presencia de caminos (Figura 5A).

En general, se apreció una tendencia negativa bien definida entre el número de incendios y la distancia a cada uno de los factores de riesgo (Figura 7). Con base en ello, se definieron los modelos correspondientes (Cuadro 3), en los cuales la mayor parte de estas tendencias se ajustaron logarítmicamente, a excepción del factor

pastizales (exponencial). En todos los casos, el ajuste fue altamente significativo ($p < 0.001$); por lo que se pueden establecer tablas de riesgo (Farfán *et al.*, 2020). Sin embargo, debe considerarse que estudios similares definen una relación entre la presencia de incendios con los cambios de superficies dedicadas a actividades agrícolas (Flores-Garnica *et al.*, 2021). Asimismo, se tienen que incluir las áreas donde el impacto de los incendios es más relevante, como que se favorezca la erosión hídrica (Velasco, 2008). La anterior información puede integrarse para la definición de zonas por clase de riesgo.



A = Caminos; B = Carreteras; C = Pastizales; D = Agricultura.

Figura 7. Tendencia de la relación entre número de incendios forestales y la distancia referida a diferentes factores de riesgo.

Cuadro 3. Modelos derivados de la correlación entre el porcentaje de incendios forestales y la distancia a los factores de riesgo.

Factor de riesgo	Modelo	R^2	F	p-valor
Caminos	$P = (-10.91 \times (\ln(D))) + 92.302$	0.9491	38.13	<0.0001
Carreteras	$P = (-7.728 \times (\ln(D))) + 67.764$	0.8914	28.89	<0.0001

Pastizales	$P = 63.81 \times (2.72^{-0.00004 \times D})$	0.9351	37.98	0.0003
Agricultura	$P = (-15.4 \times (\ln(D)) + 139.61)$	0.9243	15.55	0.0043

P = Porcentaje de incendios; D = Distancia (m); R^2 = Coeficiente de determinación.

Vegetación impactada

En la Figura 8 se muestran las principales coberturas de vegetación impactadas por los incendios forestales que ocurren en el estado de Colima. Cada uno de estos integran los siguientes tipos de vegetación (Inegi, 2018): (a) Bosques: de encino, encino-pino, pino y pino-encino; (b) Selvas: se integra por la selva baja caducifolia y selva mediana subcaducifolia; (c) Vegetación secundaria arbustiva que integra tanto vegetación de bosques como de selvas, e incluye al matorral subtropical; (d) Vegetación secundaria arbórea de bosques y selvas. Al igual que en otros estudios, como el de Salazar et al. (2004), en esta evaluación la mayoría de los incendios se localizaron, principalmente, en las zonas de vegetación secundaria de selva baja caducifolia (54.33 %), bosque de pino (20.72 %) y selva mediana subcaducifolia (17.12 %).

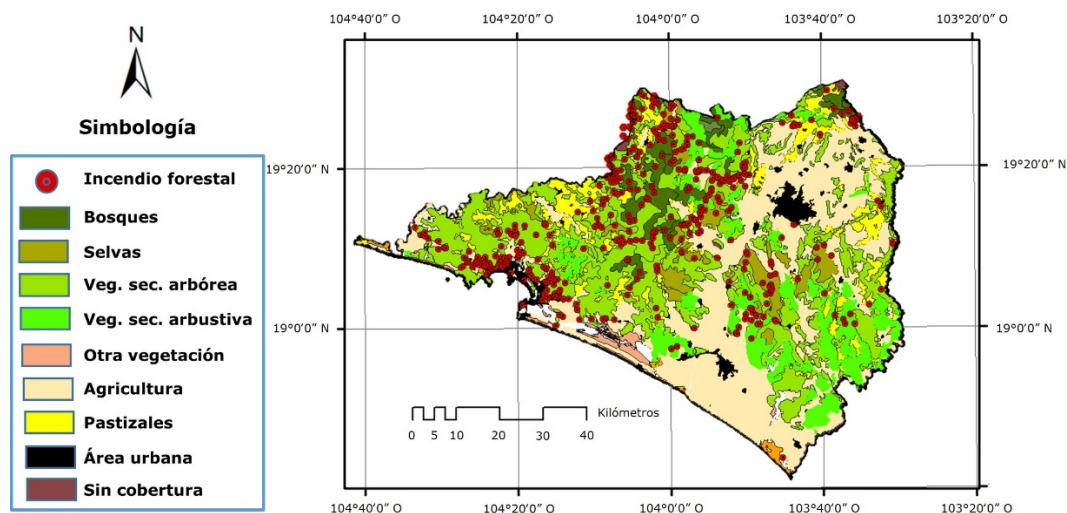
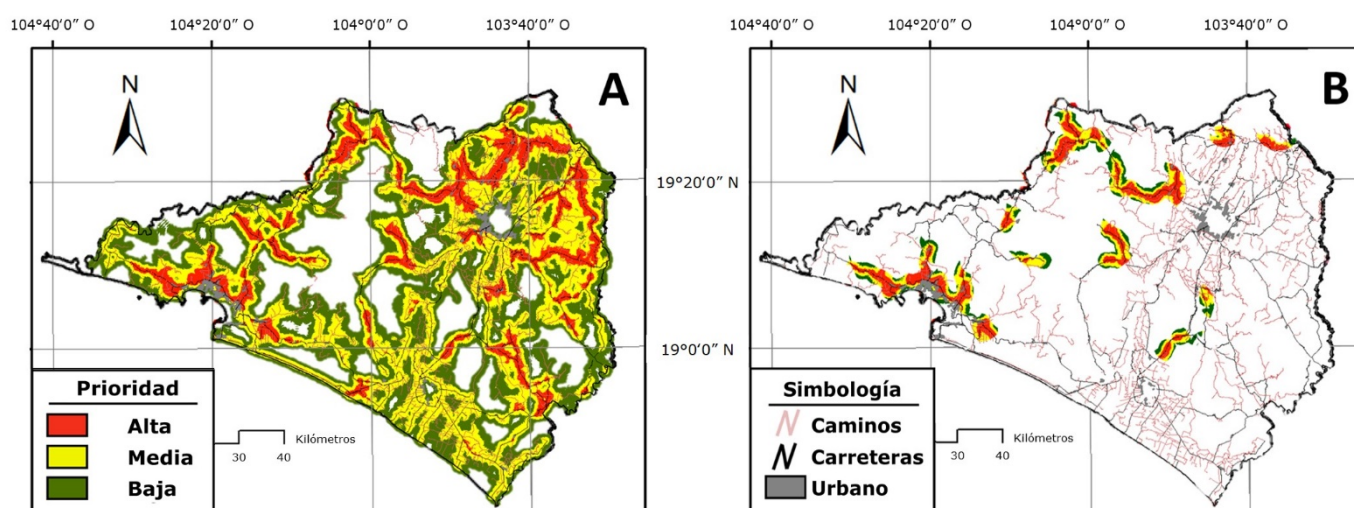


Figura 8. Tipos de vegetación en las áreas de ocurrencia de incendios forestales en el estado de Colima, México, durante el periodo 2016-2023.

Zonificación de prioridades

Conforme a los resultados, se definieron las áreas prioritarias de atención para la prevención de incendios forestales, para ello, se especificaron las siguientes clases de ponderación en relación al distanciamiento de cada uno de los factores de riesgo: (a) Pastizal y agricultura 500, 1 000, 1 500, 2 000, 2 500, 3 000 y 3 500 m; y (b) Caminos y carreteras: 250, 500, 750, 1 000, 1 250, 1 500 y 1 750 m. Con esto, se determinaron siete clases de riesgo, cuya ponderación más alta (7) correspondió a la distancia más inmediata, 500 m (pastizal y agricultura) y 250 m (caminos y carreteras). Mientras que el de menor ponderación (1) fue de 3 500 (pastizal y agricultura) y 1 750 m (caminos y carreteras). A través de álgebra de mapas se manejaron dos perspectivas para ubicar las áreas prioritarias: (1) Incluir todos los factores de riesgo; y (2) Limitar con base en las densidades de incendios. Los

resultados se ejemplificaron considerando tres clases de prioridad (Figura 9): Alta, Media y Baja. No obstante, de acuerdo a la conveniencia operativa se puede definir el número de clases más adecuado (Elgueta, 2023). Desde la primera perspectiva se observó que prácticamente se tendría que atender todo el estado de Colima, incluso zonas donde no hay ocurrencia de incendios. No obstante, si se tienen los recursos suficientes, es posible enfocar los recursos disponibles a las zonas de alta prioridad (Padilla & de la Parra, 2015). En el caso de considerar las densidades de incendio (*Kernel*), se localiza y delimita una superficie menor de prioridades, en la cual es clara la influencia de la red de caminos y carreteras.



A = Considera todos los factores de riesgo; B = Limitada por el criterio de densidad (*Kernel*).

Figura 9. Distribución espacial de zonas por prioridad de riesgo de incendios forestales.

En trabajos futuros, se podrían integrar otros factores socio-ambientales, como el clima, la topografía, la vegetación, la tenencia de la tierra, entre otros (Ibarra-Montoya & Huerta-Martínez, 2016; Jardel et al., 2010; Vilchis-Francés et al., 2015). Específicamente, es relevante remarcar la importancia de la perspectiva social, ya

que el riesgo de ocurrencia de incendios obedece, principalmente, a actividades antropogénicas, que determinan en gran medida la variación de la densidad de ocurrencia de los incendios. Asimismo, para el análisis de la densidad se deben realizar estudios comparativos que incluyan otras estrategias estadísticas usadas para definir el ancho de banda, la temporalidad de incendios, valoración de la densidad de incendios, la definición de intervalos de prioridad; así como otras variables ambientales (covariables), que además se enfoquen al análisis del peligro (impacto) potencial de los incendios.

Conclusiones

De acuerdo con los resultados se concluye que la mayor parte de los incendios forestales en Colima se presentan en la región oeste del estado, donde se practican varias actividades productivas (ganadería, agricultura, agroindustria y turismo) en zonas con vegetación secundaria de selva baja caducifolia. Una segunda zona prioritaria se localiza en la parte centro-oeste del estado. Sin embargo, año con año, se muestra una clara variación en la distribución espacial de los incendios, los cuales tienen un alto grado de densificación. Esto implica que su patrón espacial corresponde a una distribución agrupada no aleatoria, lo cual se evidencia incluso cuando se consideran diferentes números de clases de densidad. Esta distribución está, principalmente, condicionada a la cercanía con las vías de acceso; ya que al considerar tres cuartas partes del porcentaje de frecuencia de incendios forestales, es claro que la proximidad a caminos representa el factor de mayor riesgo de incendio. Se aprecia una tendencia negativa; es decir, a mayor distancia, menor número de incendios.

Específicamente, se observa que el mayor número de incendios se ubica en un intervalo de 0-1 650 m, mientras que en relación a la cercanía a carreteras la mayor frecuencia está en un intervalo de 0 a 820 m. De esta forma, la cercanía a las vías de acceso se define como un criterio de importancia para establecer el potencial de riesgo

de incendio forestal. Al respecto, se establecen dos perspectivas para ubicar las áreas prioritarias: (1) Considerar todos los factores de riesgo, y (2) Limitar según las densidades de incendios, cuyo número de clases de prioridad se determina de acuerdo a la conveniencia operativa. Finalmente, no obstante que la definición de áreas prioritarias con base en las densidades del incendio (*Kernel*) permite ubicar y delimitar las áreas por clase de riesgo de incendio, en futuros trabajos se debe integrar el análisis de la relación de esta densidad con otros factores, tanto ambientales (topografía, vegetación, clima, etc.) como sociales (tenencia, manejo de la tierra, distancia a poblados, densidad de habitantes, actividades culturales, entre otras).

Agradecimientos

Se agradece al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias por el apoyo para llevar a cabo este trabajo, el cual está relacionado al proyecto "Determinación de áreas prioritarias para implementar estrategias de restauración en ecosistemas impactados por incendios forestales".

Conflicto de intereses

Los autores manifiestan que no existen conflictos de interés.

Contribución por autores

José Germán Flores Garnica: análisis estadísticos, interpretación de resultados, estructura y redacción del manuscrito; Gabriela Orozco Gutiérrez: recopilación de datos, análisis estadísticos; Gabriela Ramírez Ojeda: redacción, revisión y corrección del manuscrito.

Referencias

- Alanís R., E., Jiménez P., J., González T., M. A., Treviño G., E. J., Aguirre C., O. A., Yerena Y., J. I., y Mata B., J. M. (2014). Efecto de los incendios en la estructura del sotobosque de un ecosistema templado. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(22), 74-85. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v5i22.351>
- Amatulli, G., Pérez-Cabello, F., & de la Riva, J. (2007). Mapping lightning/human-caused wildfires occurrence under ignition point location uncertainty. *Ecological Modelling*, 200(3), 321-333. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.08.001>
- Ávila-Flores, D. Y., Pompa-García, M., & Vargas-Pérez, E. (2010). Análisis espacial de la ocurrencia de incendios forestales en el estado de Durango. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 16(2), 253-260. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2009.08.028>
- Barrios-Calderón, R. de J., & Escobar F., R. E. (2020). Analysis of the problem of forest fires and their implications for the loss of forest cover in Cintalapa, Chiapas. *Revista de Geografía Agrícola*, (65), 63-83. <https://doi.org/10.5154/r.rga.2020.65.04>
- Bassaber-Zuñiga, A. I., Maldonado V., M. M., Curiel-Guevara, S., Rojas-Arias, M. L., y Valdez-Rosas, J. S. (2024). Revisión de causas, consecuencias y medidas de respuesta frente a los incendios forestales: un enfoque en el estado de Jalisco. *eCUCBA*, 11(21), 100-114. <https://doi.org/10.32870/e-cucba.vi21.327>
- Bautista A., M., y Rodríguez A., G. (2017). Cambio de uso del suelo y deforestación. En A. Cruz A., A. Ordorica H., J. Valero P. y E. D. Melgarejo (Coords.), *La biodiversidad en Jalisco. Estudio de Estado* (Vol. I, pp. 263-267). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad y Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial. https://www.researchgate.net/publication/325790579_La_biodiversidad_en_Jalisco_Estudio_de_Estado_vol_I
- Chávez D., Á. A., Xelhuantzi C., J., Rubio C., E. A., Villanueva D., J., Flores L., H. E., y de la Mora O., C. (2016). Caracterización de cargas de combustibles forestales para el manejo de reservorios de carbono y la contribución al cambio climático. *Revista Mexicana de Ciencias*

Agrícolas, (13), 2589-2600. <https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v7nspe13/2007-0934-remexca-7-spe13-2589.pdf>

Comisión Nacional Forestal. (2024, 24 de agosto). *Estadísticas y mapas* [Conjunto de datos]. Manejo del fuego. <https://snif.cnf.gob.mx/incendios/>

Cruz E., M. Á., Rodríguez T., D. A., Villanueva M., A., y Santillán P., J. (2017). Factores sociales de uso del suelo y vegetación asociados a los incendios forestales en Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(41), 139-163. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i41.29>

Díaz-Hernández, D., Rodríguez-Laguna, R., Rodríguez-Trejo, D. A., Acevedo-Sandoval, A., y Maycotte-Morales, C. C. (2021). Dinámica de la regeneración de *Pinus montezumae* posterior a un incendio y a quema prescrita. *Botanical Sciences*, 99(1), 58-66. <https://doi.org/10.17129/botsci.2634>

Elgueta G., V. N. (2023). Clasificación de la amenaza por incendios forestales en campamentos del Anfiteatro de Valparaíso. *Revista Cartográfica*, 107, 35-56. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2663-39812023000200035&lng=es&nrm=iso

Espinoza J., A. R., y Gómez M., L. (2019). Incendios forestales y el fenómeno de sequía: el caso de San Luis Potosí, México. *Tlalli. Revista de Investigación en Geografía*, 1(1), 13-24. <https://doi.org/10.22201/ffyl.26832275e.2019.1.381>

Farfán G., M., Flamenco S., A., Rodríguez P., C. R., Rodrigues de Sousa S., L., González G., I., y 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>

Flores G., J. G., Benavides S., J. de D., Valdez R., C., Vega M. de O., D. G., y Casillas D., U. D. (2016). *Descripción de variables para definición de riesgo de incendios forestales en México*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.

https://www.researchgate.net/publication/370124776_Descripcion_de_variables_para_definicion_de_riesgo_de_incendios_forestales_en_Mexico

Flores-Garnica, J. G., & Macías-Muro, A. (2018). Bandwidth selection for kernel density estimation of forest fires. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 24(3), 313-327. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2017.12.074>

Flores-Garnica, J. G., Reyes-Alvarado, A. G., y 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>

Flores-Garnica, J. G., y 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-Rodríguez, A. G., Flores-Garnica, J. G., González-Eguiarte, D. R., Gallegos-Rodríguez, A., Zarazúa-Villaseñor, P., y Mena-Munguía, S. (2020). Revisión de métodos de sensores remotos para la detección y evaluación de la severidad de incendios forestales. *Gestión y Ambiente*, 23(2), 273-283. <https://doi.org/10.15446/ga.v23n2.93682>

Fuenzalida D., M., Cobs M., V., y Guerrero E., R. (2013). El territorio como unidad de análisis en estudios sobre las determinantes sociales de la salud. *Argos*, 30(59), 87-106.

https://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S0254-16372013000200006&script=sci_abstract

Fulé, P. Z., Covington, W. W., Smith, H. B., Springer, J. D., Heinlein, T. A., Huisinga, K. D., & Moore, M. M. (2002). Comparing ecological restoration alternatives: Grand Canyon, Arizona. *Forest Ecology and Management*, 170(1-3), 19-41. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00759-9](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00759-9)

Fulé, P. Z., Ramos-Gómez, M., Cortés-Montaña, C., & Miller, A. M. (2011). Fire regime in a Mexican forest under indigenous resource management. *Ecological Applications*, 21(3), 764-775. <https://doi.org/10.1890/10-0523.1>

- Galindo, I., Barrón, J., y Padilla, J. I. (2009). Relación entre ganadería extensiva e incendios en zonas forestales del estado de Colima. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 13(3), 17-33. <http://ww.ucol.mx/reviaia/pdf/2009/sept/3.pdf>
- Gollberg, G. E., Neuenschwander, L. F., & Ryan, K. C. (2001). Introduction: Integrating spatial technologies and ecological principles for a new age in fire management. *International Journal of WildLand Fire*, 10(4), 263-265. <https://www.scirp.org/%28S%28lz5mqp453edsnp55rrgjct55%29%29/reference/referencepapers?referenceid=2225869>
- Ibarra-Montoya, J. L., y Huerta-Martínez, F. M. (2016). Modelado espacial de incendios: una herramienta predictiva para el Bosque La Primavera, Jalisco México. *Revista Ambiente & Água*, 11(1), 35-49. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1536>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (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/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463842781>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2022). *Red Nacional de Caminos RNC. 2022. Vías de comunicación*. Inegi. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463770558>
- Jardel P., E. J., Alvarado, E., Morfín R., J. E., Castillo N., F., y Flores-Garnica, J. G. (2009). Regímenes de incendios en ecosistemas forestales de México. En J. G. Flores-Garnica (Coord.), *Impacto ambiental de incendios forestales* (pp. 73-100). Mundi-Prensa México, S. A. de C. V. https://www.researchgate.net/publication/370100537_Regimenes_de_fuego_en_ecosistemas_forestales_de_Mexico
- Jardel P., E. J., Frausto L., J. M., Pérez S., D., Alvarado, E., Morfín R., J. E., Landa P., R., y Llamas C., P. (Eds.). (2010). *Prioridades de investigación en manejo del fuego en México. Memorias del taller realizado en el Campus Morelia de la Universidad Nacional Autónoma de México*. Fondo Mexicano para la Conservación

- de la Naturaleza, A. C. https://www.camafu.org.mx/wp-content/uploads/2017/12/Priorids_Investg_eBook_OK.pdf
- Moraga P., J. C. (2010). Evaluación del riesgo ante incendios forestales en la cuenca del río Tempisque, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, (45), 33-64. <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/77>
- Neger, C. (2021). Causas antrópicas de los incendios forestales en la sierra de los Tuxtlas, México. En E. Serna M. (Ed.), *Ciencia transdisciplinar para el desarrollo y la supervivencia de la humanidad* (pp. 376-393). Instituto Antioqueño de Investigación. https://www.researchgate.net/publication/353756512_Causas_antropicas_de_los_incendios_forestales_en_la_sierra_de_los_Tuxtlas_Mexico
- Ocampo-Zuleta, K., y Beltrán-Vargas, J. (2018). Modelación dinámica de incendios forestales en los Cerros Orientales de Bogotá, Colombia. *Madera y Bosques*, 24(3), Artículo e2431662. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2431662>
- Padilla L., R., y de la Parra A., M. (2015). Sistematización de la recurrencia de amenazas naturales y desastres en el estado de Colima, México. *Estudios sobre las Culturas Contemporáneas*, 21(2), 143-165. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=31639208008>
- Pérez-Verdín, G., Márquez-Linares, M. A., Cortes-Ortiz, A., y Salmerón-Macías, M. (2013). Patrones de distribución espacio temporal de los incendios forestales en el norte de México. En A. González-Cabán (Coord.), *Memorias del Cuarto Simposio Internacional Sobre Políticas, Planificación y Economía de los Incendios Forestales: Cambio Climático e Incendios Forestales Informe Técnico General PSW-GTR-245* (pp. 221-232). Departamento de Agricultura de los EE. UU., Servicio Forestal. https://www.fs.usda.gov/psw/publications/documents/psw_gtr245/es/psw_gtr245_221.pdf
- Pompa G., M., y Hernández G., P. (2012). Determinación de la tendencia espacial de los puntos de calor como estrategia para monitorear los incendios forestales en Durango, México. *Bosque*, 33(1), 63-68. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002012000100007>
- Rodríguez T., D. A., Ramírez M., H., Tchikoué, H., y Santillan P., J. (2008). Factores que inciden en la siniestralidad de los incendios forestales. *Revista*

- Ciencia Forestal en México*, 33(104), 37-58.
<https://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/736>
- Rojas E., L. I., Romo L., J. L., Rodríguez T., D. A., y Villanueva-Morales, A. (2022). Susceptibilidad a incendios en el Campo Forestal Experimental Las Cruces, Texcoco, México: una priorización basada en el enfoque multicriterio. *Sociedad y Ambiente*, (25), 1-35. <https://doi.org/10.31840/sya.vi25.2484>
- Ruíz-Corzo, R., Raj A., D., Venegas-Sandoval, A., Jerez-Ramírez, D. O., Fernández-Zúñiga, K. S., López-Cruz, S. del C., López-Hernández, J. C., Peña-Alvarez, B., y Velázquez-Sanabria, C. A. (2022). Dinámica temporal de combustibles forestales y efecto del incendio en Cerro Nambiyugua, Chiapas, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 9(2), Artículo e3253. <https://doi.org/10.19136/era.a9n2.3253>
- Salazar C., E. del C., Zavala C., J., Castillo A., O., y Cámara A., R. (2004). Evaluación espacial y temporal de la vegetación de la Sierra Madrigal, Tabasco, México (1973-2003). *Investigaciones Geográficas*, (54), 7-23. <https://doi.org/10.14350/rig.30128>
- Salvati, L., & Ferrara, A. (2015). Validation of MEDALUS Fire Risk Index using Forest Fire Statistics through a multivariate approach. *Ecological Indicators*, 48, 365-369. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.08.027>
- Sánchez-Velásquez, L. R., y Pineda-López, M. del R. (2008). Vacas y bosques de la Sierra de Manatlán: Estrategias de restauración y manejo. En L. R. Sánchez-Velásquez, J. Galindo-González y F. Díaz-Fleischer (Eds.), *Ecología, manejo y conservación de ecosistemas de montaña en México* (pp. 201-209). Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad, Universidad Veracruzana y Mundi Prensa México, S. A. de C. V. https://www.researchgate.net/publication/282981347_ECOLOGIA_MANEJO_Y_CONSERVACION_DE_LOS_ECOSISTEMAS_DE_MONTANA_EN_MEXICO
- Silverman, B. W. (1986). *Density estimation for statistics and data analysis*. Chapman & Hall. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1212462>
- Tobler, W. R. (1970). A computer movie simulating urban growth in the Detroit

region. *Economic Geography*, 46, 234-240.

<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.2307/143141>

Turlach, B. A. (1999). Bandwidth selection in Kernel density estimation: A review. In A. Doria & P. Pauletto (Eds.), *Handbook of Systemic Autoimmune Diseases* (pp. 1-33). Elsevier.
https://www.researchgate.net/publication/2316108_Bandwidth_Selection_in_Kernel_Density_Estimation_A_Review

Vega R., A., y Martinez T., F. (2020). La quema de cañaverales y su influencia en la composición de arvenses, en zonas de la costa ecuatoriana. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 1(1), 74-80.

<https://uctunexpo.autanabooks.com/index.php/uct/article/view/318>

Velasco H., J. A. (2008). Erosión hídrica del estado de Colima, México. *LACANDONIA, Revista de Ciencias de la UNICACH*, 2, 33-45.

<https://repositorio.unicach.mx/handle/20.500.12753/1765>

Vilchis-Francés, A. Y., Díaz-Delgado, C., Magaña-Lona, D., Bâ, K. M., y Gómez-Albores, M. A. (2015). Modelado espacial para peligro de incendios forestales con predicción diaria en la Cuenca del Río Balsas. *Agrociencia*, 49, 803-820.
<https://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v49n7/v49n7a8.pdf>



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