

Análisis espacial de la interacción del fuego en la interfaz rural del Parque Nacional La Malinche, México

Spatial analysis of fire interaction in the rural interface of La Malinche National Park, Mexico

Sandra Palomino Silva,* Lenom Cajuste Bontemps** y Dante Arturo Rodríguez Trejo***†

Recibido: 01/12/2024. Aceptado: 24/02/2025. Publicado: 01/04/2025.

Resumen. Se abordan las quemas agrícolas e incendios forestales ante la problemática del uso del fuego en las parcelas como principal fuente de ignición de los incendios que impactan los bosques de México. El objetivo de este estudio fue identificar patrones de distribución espacial de las áreas quemadas y sus vínculos con usos de suelo, enfatizando las áreas agrícolas y pobladas. Se realizó un análisis espacial de la superficie quemada, su agrupamiento y vínculo con los usos de suelo a través del índice de Moran Global y local, univariado y bivariado. Adicionalmente, se obtuvieron las longitudes del borde agrícola-forestal y la distancia del perímetro de las áreas pobladas a las áreas quemadas. El índice de Moran indicó alta dependencia espacial positiva entre áreas quemadas, una relación positiva con el uso agrícola, aleatoria con las áreas forestales, negativa con áreas pobladas y positiva con el borde agrícola-forestal. A partir del borde agrícola-forestal, a 50 m se concentra el 38.57% de la superficie quemada del parque, a 250 m el 81.02% y a 500 m el 89.21%. A 2500 m de distancia del perímetro del área poblada se presenta la mayor cantidad de superficie quemada. Se concluyó que el fuego se concentra principalmente en la frontera agrícola-forestal y hay una tendencia general de asociación de las áreas agrícolas con la ocurrencia del fuego.

Palabras clave: autocorrelación espacial, borde, incendio forestal, índice de Moran, quemas agrícolas.

Abstract. Agricultural burning and forest fires are addressed in the context of the problematic use of fire on plots of land as the main source of ignition for the fires that impact Mexico's forests. The objective of this study was to identify spatial distribution patterns of burned areas and their links to land use, emphasizing agricultural and populated areas. A spatial analysis of the burned area, its clustering and link to land use was carried out using the Global and Local Moran's Index, univariate and bivariate. In addition, the lengths of the agricultural-forest edge and the distance from the perimeter of populated areas to burned areas were obtained. The Moran's I index indicated a high positive spatial dependence between burned areas, a positive relationship with agricultural use, a random relationship with forest areas, a negative relationship with populated areas and a positive relationship with the agricultural-forest edge. From the agricultural-forestry border, 38.57% of the park's burned area is concentrated at 50 m, 81.02% at 250 m and 89.21% at 500 m. The greatest amount of burnt surface occurs at

* Estudiante del Colegio de Postgraduados. Boulevard Forjadores de Puebla 205, Santiago Momoxpan, San Pedro Cholula, 72760, Puebla, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0917-9479>. Email: sandrapalomino2@hotmail.com. Autora de correspondencia.

** Investigador titular Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco Km. 36.5, Montecillo, Texcoco, 56264, Edo. de México, México. Email: lenomcb1@colpos.mx. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2810-1578>

*** Profesor Investigador Titular (fallecido). División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo. Km. 38.5 Carretera México-Texcoco Chapingo, Chapingo, 56230, Texcoco, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1407-8365>. Email: dantearturo@yahoo.com

a distance of 2,500 m from the perimeter of the populated area. It was concluded that the fire is mainly concentrated on the agricultural-forestry border and there is a general trend of association of agricultural areas with the occurrence of fire.

Keywords: Spatial autocorrelation, edge, forest fire, Moran's I, agricultural burning.

INTRODUCCIÓN

Los regímenes de incendios de los ecosistemas forestales son alterados por asentamientos humanos y su gestión, tanto al iniciarlos como al suprimirlos (Parisien *et al.*, 2006; Rodríguez *et al.*, 2008; Yang *et al.*, 2007). Históricamente, el fuego ha sido una herramienta importante en el manejo de los recursos naturales. Un régimen de fuego alterado es un factor de disturbio que influye en los ecosistemas forestales al modificar su estructura y composición y, simultáneamente, la fragmentación modifica las condiciones para su ocurrencia (Alva-Álvarez *et al.*, 2018; Cochrane, 2001). En México, las comunidades campesinas e indígenas mantienen el uso del fuego en la agricultura conforme a sus patrones socioculturales, tradiciones y recursos técnico-económicos, como herramienta de bajo costo necesaria y alternativa tecnológica en la agricultura de autoconsumo, bajo un patrón de economía de subsistencia y degradación ambiental (Frausto, 2006). También en México, históricamente, las quemadas culturales o tradicionales, junto con los incendios de origen natural, han ayudado a la presencia de más incendios de menores intensidades y severidades, que ayudaron a mantener los ecosistemas forestales sanos, pero en las comunidades rurales donde se perdió tal conocimiento se tiende a tener escapes en actividades agropecuarias, con incendios de mayor intensidad y severidad que degradan los bosques (Pyne, 2024).

Korontzi *et al.* (2006) estimaron que en México las quemadas agrícolas representan el 12% del fuego; mientras que Ríos y Raga (2018) estimaron el 37%. SEMARNAT (2022) indica que de 2004 a 2020 el 38.05% de los incendios forestales son por actividades agropecuarias. Rodríguez-Trejo y Fulé (2003) indican que en el centro de México el 56% de los incendios forestales son provocados

por actividades agrícolas y el 5% por actividades pastoriles. Wong y Villers (2007) reportan que en el Parque Nacional La Malinche (PNLM) el 55% de los incendios forestales ocurren en la zona de agricultura de temporal.

Se ha investigado sobre los patrones espaciales del fuego en México y Centroamérica, así como los puntos de calor vinculados con la expansión de áreas agropecuarias (Flores-Garnica *et al.*, 2021; Ríos y Raga, 2018). Hay una mayor cantidad de estudios que buscan identificar patrones de distribución asociados a incendios forestales, agrupando los datos en unidades fisiográficas a distintas escalas (Ávila-Flores *et al.*, 2010; Monjarás-Vega *et al.*, 2020; Pérez-Verdín *et al.*, 2013). En el estado de Puebla, Carrillo *et al.* (2012) generaron un modelo de los incendios forestales utilizando análisis espacial en el que determinaron que están relacionados con condiciones ambientales y la influencia humana. En el Parque Nacional La Malinche (PNLM), Villers y López (2004) y Wong y Villers (2007) realizaron estudios centrados en las características de los combustibles, las geoformas y las condiciones microclimáticas vinculadas con los incendios forestales desde una perspectiva preventiva. En el PNLM se reporta relación positiva entre los incendios forestales y la agricultura, la fragmentación, la altitud y la exposición, sin analizar a profundidad estos aspectos.

Las particularidades en la distribución del fuego en el PNLM sugieren variabilidad por factores físicos y socioeconómicos, lo que da origen a este estudio de la estructura espacial de las áreas quemadas, partiendo de información confiable. El objetivo fue identificar patrones de distribución espacial de las áreas quemadas y sus vínculos con usos de suelo, enfatizando el borde agrícola-forestal y la distancia con respecto a áreas pobladas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El Área Natural Protegida PNLM fue decretada en 1938. Se ubica en el eje Neovolcánico transversal; la coordenada central es 19°13'43.96'' N y 98°1'54.41'' O. La altitud oscila entre 2

400 y 4 460 msnm, con clima de templado a frío (CONANP, 2013); las temperaturas promedio anuales son de 2 a 18 °C. La superficie del parque es de 46 112.24 ha (CONANP, 2013); el 24.56% de la superficie es propiedad de 33 ejidos (RAN, 2020), y el 75.44% no fueron asignadas por la Federación, pero sí por las autoridades locales, actualmente la propiedad es semejante a la “propiedad privada”. Los Inventarios Forestales Estatales de los estados de Puebla y Tlaxcala señalan que el 55.39% de la superficie es de uso agropecuario y el 42% es forestal (CONAFOR, 2013, 2014). La agricultura es de temporal de ladera en metepantles con prácticas tradicionales-ancestrales aplicadas a la producción de granos para autoconsumo, frutales y maguey. Las poblaciones son principalmente pueblos originarios nahuas, y su territorio se rige por usos y costumbres. En las zonas agrícolas, forestales y llanos intermontanos hay pastoreo de ganado vacuno, caprino y ovino (CONANP, 2013). Las áreas forestales están

formadas por bosque de pino, pino-encino, oyamel, aile y táscate (CONAFOR, 2013, 2014). Esta ANP está formada por 12 municipios del estado de Tlaxcala y cuatro del estado de Puebla (Figura 1). La región ha tenido una dinámica de crecimiento de las zonas pobladas derivada de la cercanía con el área metropolitana Puebla-Tlaxcala.

Autocorrelación espacial

Se utilizó el índice de Moran Global para evaluar la presencia de autocorrelación de las áreas quemadas. El índice de Moran Global es un estadístico de producto cruzado entre una variable y su retraso espacial, con la variable expresada en desviaciones de su media (Anselin, 2020). Su fórmula es la siguiente (Anselin, 2020; Buzai y Montes, 2021).

$$I = \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} z_i \cdot z_j / S_0}{\sum_i z_i^2 / n} \quad (1)$$

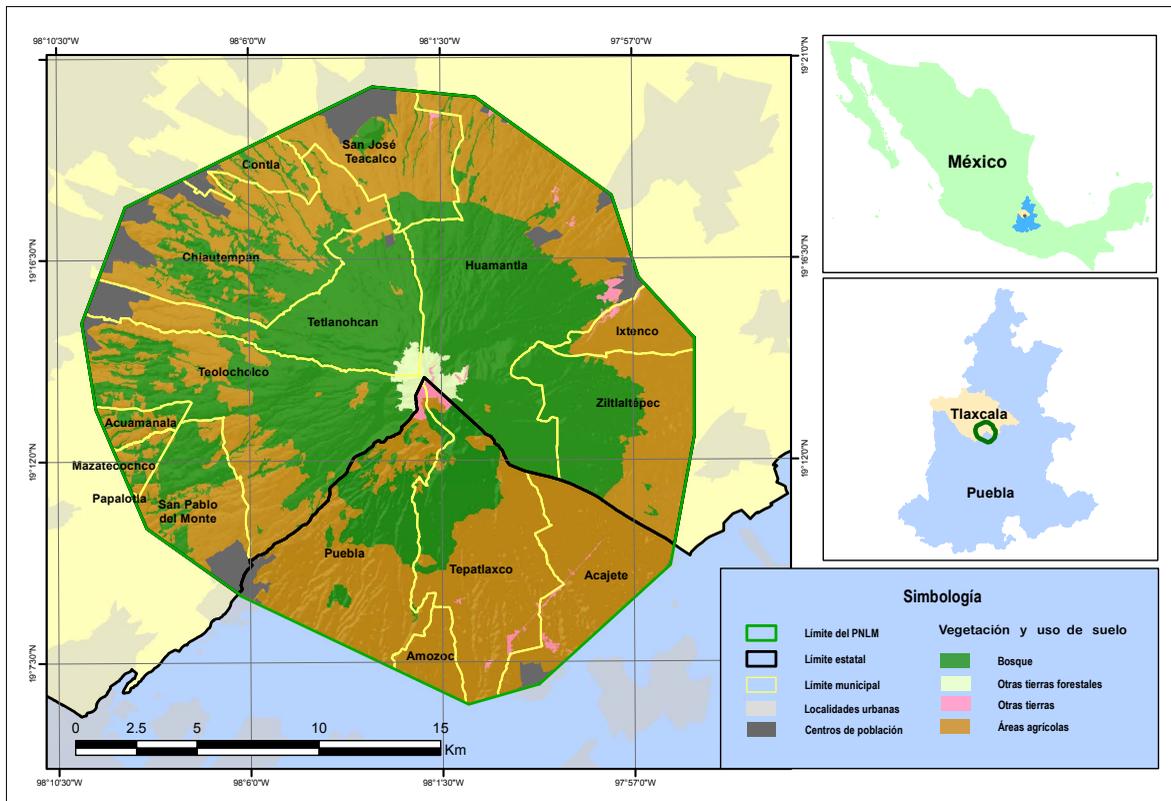


Figura 1. Mapa de ubicación y contexto del área de estudio. Fuente: elaboración propia.

Donde: I es el índice de Moran, Z_i es $x_i - \bar{x}$, \bar{x} es la media de la variable para una observación en el lugar i , w_{ij} son los elementos de la matriz de pesos espaciales, S_o es igual a $\sum_i \sum_j w_{ij}$ la suma de los pesos, y n es número de observaciones o unidades de análisis.

Un valor positivo muestra una tendencia hacia la agrupación o similitud, un valor negativo a la dispersión o disimilitud, 0 indica aleatoriedad. La significancia del Índice de Moran se basó en una hipótesis nula de aleatoriedad espacial. El valor observado se comparó con los valores críticos de la aplicación de un test de normalidad o distribución de referencia obtenido mediante permutación aleatoria de los valores observados en las ubicaciones (Anselin, 2020; Buzai y Montes, 2021).

Indicadores locales de asociación

Se utilizó el indicador local de asociación espacial (Local Indicators of Spatial Association, LISA) o índice de Moran Local. El índice LISA fragmenta el valor de autocorrelación global y verifica cuánto contribuye cada unidad espacial (Anselin, 1995); permite identificar grupos locales, clústeres o patrones espaciales de entidades que poseen valores similares, hot-spots y cold-spots, así como valores atípicos y no significativos. La fórmula de cálculo es la siguiente (Anselin, 2020):

$$I_i = z_i \sum_j w_{ij} z_j$$

Donde I_i es el índice de Moran local, Z_i y Z_j son desviaciones de la media de las unidades espaciales contiguas y W_{ij} es la matriz de pesos, j son los vecinos.

La regla de decisión lógica de los agrupamientos compara el valor central (x_i) con la media global (\bar{x}_G) y la media de sus vecinos (\bar{x}_L) (Siabato y Guzmán-Manrique, 2019). Las pruebas de aleatoriedad y significancia se calcularon para cada celda en los términos previamente indicados.

Autocorrelación espacial bivariada

Este índice identifica el grado de asociación entre dos o más variables que se desarrollan en el mismo marco geográfico. Mide el grado en que el valor de una variable dada en una ubicación se correlaciona

con sus vecinos para una variable diferente (Anselin, 2019; Buzai y Montes, 2021). Este estadístico ha sido usado por Gaither *et al.* (2011) para vincular el riesgo de incendios forestales con aspectos socioeconómicos en el sur de Estados Unidos. La fórmula usada es la siguiente (Gaither *et al.*, 2011).

$$I_i = z_{xi} \sum_{j=1, j \neq i}^N W_{ij} z_{yj}$$

Donde I_i es el índice de Moran local, x y y son dos variables de interés en la unidad i , j es un vecino, Z_x y Z_y representan puntuaciones estandarizadas para las variables x y y , respectivamente.

En la elección de la fuente de información para el área quemada se consideró que los registros oficiales de incendios forestales no incluyen quemas agrícolas. Además, tienen la desventaja de ser incompletos (Rodríguez y Mendoza, 1992; Wong y Villers, 2007) e imprecisos en su componente espacial (González-Gutiérrez *et al.*, 2019). El insumo principal en el análisis de autocorrelación son los resultados de la evaluación de área quemada con el sensor Sentinel 2 realizada de 2016 a 2021 en el PNLN. Estos resultados fueron validados en campo, y se obtuvo el 89.38% de precisión global.

Otros insumos fueron las áreas pobladas indicadas en el Marco Geoestadístico Nacional 2020 por el Instituto Nacional de Información Geográfica y Estadística (INEGI, 2020). Las áreas agrícolas son las definidas en la frontera agrícola versión III del Servicio de Información Agropecuaria y Pesquera (SIAP, 2021). En la categoría otras tierras se incluyó la autopista Puebla-Perote, y las áreas rocosas de alta montaña indicadas en los inventarios forestales y de suelos de los estados de Puebla y Tlaxcala (CONAFOR, 2013, 2014). El territorio restante son las áreas forestales: bosques, páramo de altura y bosques degradados no incluidos como áreas agrícolas o pobladas.

La información se organizó en una cuadrícula regular o polígono de registro de 1 ha, formada por 46 603 unidades, manteniendo una escala adecuada para la expresión de patrones (Parisien *et al.*, 2006). En cada unidad se registró el atributo

superficie acumulada quemada en los cinco años para el análisis univariado, y los usos de suelo: agropecuario, forestal, centros de población y el borde agrícola-forestal para el análisis bivariado. Los índices de autocorrelación se obtuvieron en el software Geoda 1.8.8. En todos los casos se usó una matriz con criterio de vecindad de tipo reina de orden 1 (Gaither *et al.*, 2011). Se usó este arreglo matricial considerando que la dispersión del fenómeno en el espacio es multidireccional. Los valores de referencia se obtuvieron con 99 999 permutaciones y un nivel de significancia de 0.05, en cada caso se indica el nivel máximo alcanzado.

Fragmentación y el borde agrícola-forestal

El borde es una frontera común entre fragmentos del paisaje (Alva-Álvarez *et al.*, 2018). A nivel de paisaje, la ocurrencia de incendios y propagación del fuego es el resultado de complejas interacciones entre las fuentes de ignición, la cubierta del suelo, el clima y la topografía. Cochrane (2001) señala el proceso sinérgico entre la fragmentación y el fuego cuantificado a través de longitudes de borde. En esta investigación se consideraron como fragmentos o parches áreas homogéneas formadas por superficies forestales y agrícolas. Se usaron las coberturas descritas en el apartado de autocorrelación espacial. Las métricas obtenidas fueron: área del parche (ha), índice del parche mayor (%), longitud de borde (m), ancho de borde (m, ha), y zona núcleo (ha) (Alva-Álvarez *et al.*, 2018; Co-

chrane, 2001). El ancho de borde es la distancia desde el borde agrícola-forestal al interior de la masa forestal (Cochrane, 2001), y hacia las áreas agrícolas. Se trazaron anchos de borde a 50 m de longitud hasta 500 m de distancia del borde y de 500 m de longitud hasta los 3000 m de borde, de acuerdo a los resultados de Cochrane (2001). Para cada ancho de borde se obtuvo el área, la superficie quemada acumulada y no acumulada.

Adicionalmente se calculó la distancia del perímetro de áreas pobladas a las áreas quemadas. Para vincular los resultados de autocorrelación espacial y el análisis de bordes se realizó la prueba de autocorrelación bivariado entre las áreas quemadas y el borde agrícola-forestal. Adicionalmente, se recabaron observaciones en los recorridos de campo por el parque, particularmente por las áreas con características conspicuas; estos aspectos que se incorporan en la discusión de resultados.

RESULTADOS

Autocorrelación espacial univariada

El índice de Moran Global obtenido es de 0.75 y explica el 75% de la estructura global de asociación lineal entre las unidades de área quemada acumulada (Tabla 1). El índice de Moran local señala que hay 8277 unidades de estudio (17.76%) con superficies altas quemadas rodeadas de superficies altas quemadas. Se encontraron 20 428 unidades

Tabla 1. Valores críticos y cantidad de unidades de los aglomerados de autocorrelación univariada y bivariada.

Variable	Valores calculados				Unidades por conglomerado				
	IdeM	E(I)	Z-value	p	AA	BB	BA	AB	NS
AQ	0.75	0.0	322.11	0.00001	8 277	20 428	529	70	17 299
AQ-AA	0.14	0.0	82.17	0.00001	6 034	16 148	10 048	3963	10 410
AQ-AF	-0.07	0.0	-44.02	0.00001	4 259	11 858	14 617	5503	10 366
AQ - AP	-0.12	0.0	-72.77	0.00001	167	0	2552	14 682	29 202
AQ-BAF	0.13	0.0	81.00	0.00001	3 903	11 305	5293	4235	21 867

IdeM= índice de Moran, E(I)= valor esperado, p =pseudovalor p. AA= Altos-altos; BB= bajos-bajos; BA=Bajos altos, AB = altos bajos, NS = no significativo. AQ = área quemada, AQ-AA= área quemada-área agrícola, AQ-AF = área quemada-área forestal, AQ-AP = Área quemada - área poblada, AQ-BAF= área quemada - borde agrícola forestal.

Fuente: elaboración propia.

(43.84%) con superficies bajas quemadas rodeadas de superficies bajas quemadas (Tabla 1). Las unidades alto-alto se ubican en los municipios de Puebla, Tepatlaxco, Amozoc, Teolochoico, San Pablo del Monte, Chiantempán, Ixtenco y Zitlaltepec (Figura 2a); las unidades bajo-bajo están principalmente en la parte central del ANP y alta del volcán en Tlaxcala. La Tabla 1 indica los valores críticos de autocorrelación univariada y bivariada entre el área quemada y los usos de suelo. Se incluyen medidas estadísticas como el Índice de Moran (IdeM), el valor esperado (E(I), el valor Z (Z-value) y el pseudovalor p (p). Además, se detallan las unida-

des por conglomerado en diferentes categorías de autocorrelación espacial (AA, BB, BA, AB, y NS).

Autocorrelación espacial bivariada

El valor del índice de Moran Global bivariado entre el área quemada acumulada y áreas de uso agropecuario es de 0.137, la relación espacial es positiva (Tabla 1). El análisis de conglomerados indica que 6034 unidades (12.04%) tienen alta superficie quemada acumulada y alta superficie agrícola (AA, altos-altos). Una franja concentra los valores altos-altos (AA) en la parte baja, desde el perímetro del parque hasta aproximadamente 7 km

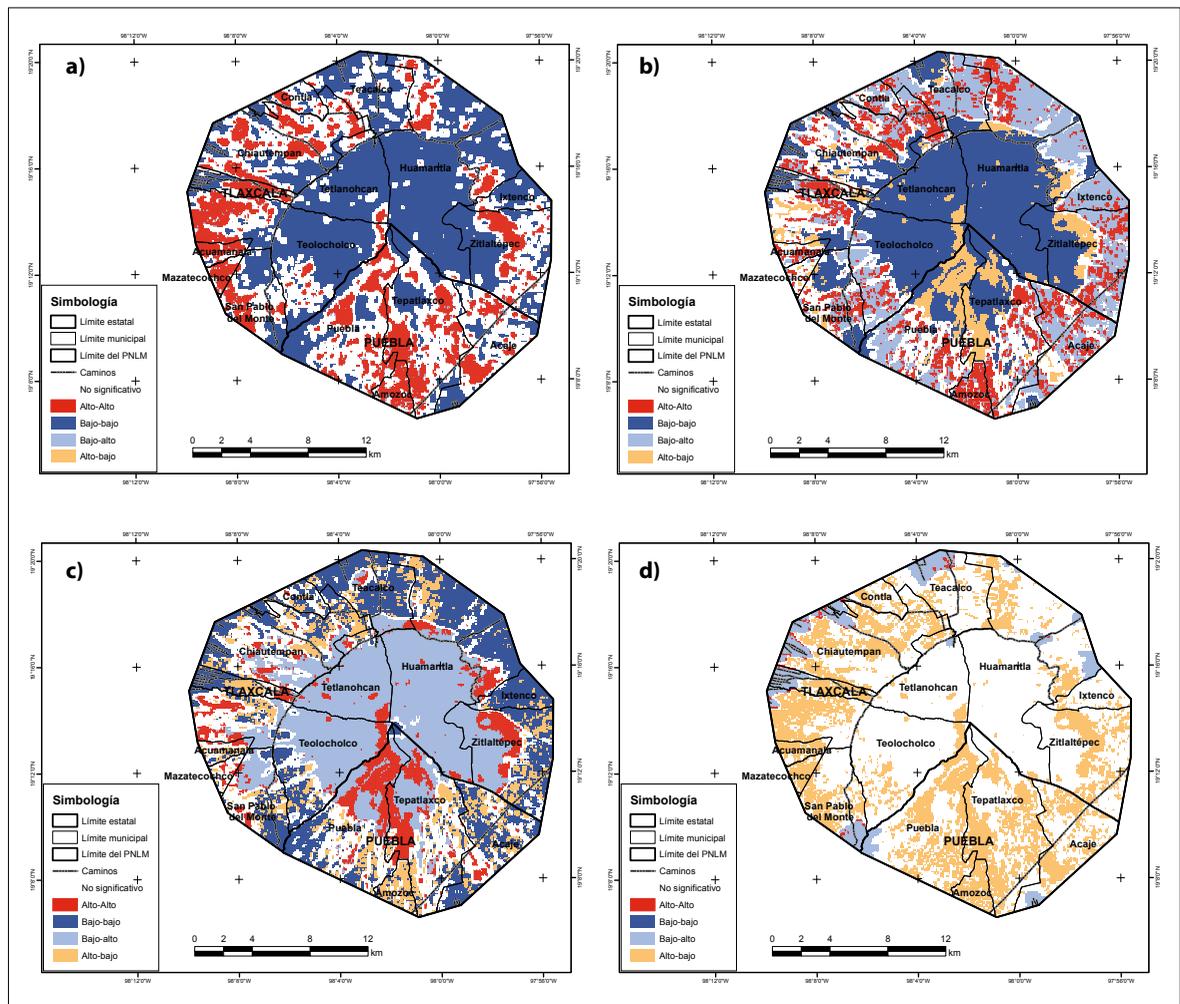


Figura 2. A) mapa de conglomerados de indicadores locales de asociación espacial (LISA) univariado; b) bivariado con áreas agrícolas, c) forestales y d) áreas pobladas. Fuente: elaboración propia.

a su interior. Se aprecia una clara concentración en el municipio de Amozoc, y porciones irregulares del resto de los municipios (Figura 2b). Otro aspecto relevante del mapa son las 16 148 unidades bajo-bajo (BB) (34.65%), áreas que no se queman y que no tienen superficie agrícola, cuya ubicación es en las poblaciones y áreas forestales compactas. Se observan 3963 unidades bajo- alto (BA), áreas agrícolas que no se queman, concentradas al noroeste del ANP y de forma irregular en la periferia (Figura 2b).

El valor del índice con las áreas forestales es de -0.073 y significa que hay una relación aleatoria, ligeramente negativa. Se identificaron 4259 unidades de análisis (9.1%) con altos valores de área quemada y altos valores de área forestal (AA) (Tabla 1). Estas áreas se ubican al noreste del parque en una franja de los siguientes municipios: Puebla, Tepatlaxco, Zitlaltepec y Huamantla, y áreas más pequeñas y dispersas ubicadas de Contla, Tlaxcala hacia Canoa, Puebla (Figura 2c). Se identificaron 14 617 valores bajo-alto (BA) (31.36%), zonas forestales que no están vinculadas con el fuego, principalmente el macizo forestal ubicado en la parte alta de la montaña y porciones irregulares hacia Chiautempan y Teolocholco. Las 11 588 unidades bajo-bajo (BB) (24.86%) son áreas no forestales que no se queman en centros de población y zonas agrícolas (Figura 2c).

El valor del índice de las áreas pobladas es -0.12; es decir, las 13 áreas pobladas no tienen alta superficie de área quemada. Se encontraron 167

unidades de áreas quemadas AA en la periferia de algunas localidades (Figura 2d).

Fragmentación y el borde agrícola-forestal

El PNLM tiene un área de 46 112.3 ha, el parche mayor es forestal y mide 23 449.65 ha, el 50.85% del ANP. Este parche forma la parte central del ANP, la cual es área forestal compacta, sin fragmentos agrícolas al interior. Sin embargo, su periferia tiene múltiples ramificaciones formadas por cañadas y barrancas alargadas en el sentido de los escurrimientos. La superficie promedio anual quemada es de 4366.1 ha, el 10.56% del área del parque.

Entre 0 y 50 m del borde en las áreas forestales se ubica el 36.08% del área quemada forestal (AQF), aumentando al 41.31 y 80.91% a 250 y 500 m, respectivamente (Figura 3a). A 50 m de dicho borde se presenta el 41.31% del área quemada agrícola (AQA), a 250 m es el 91.12% y a 500 m el 98.09% (Figura 3a). Por otro lado, a 50 m a ambos lados del borde agrícola-forestal (BAF) encontramos el 38.57% del área total quemada (ATQ) del parque nacional, a 250 m el 81.02% y a 500 m el 89.21%. En el área forestal (parche mayor) a 1000 m del borde agrícola-forestal se localiza el 86.92% del área quemada, a 2000 m el 90.82% y a 3000 m el 95.71% (Figura 3b). En las áreas agrícolas fuera del área de borde de 500 m se encontraron 210.39 ha quemadas, el 2% de la superficie quemada del parque.

A 100 y 150 m del borde forestal se quema el 17.6 y 16.1% de la superficie del borde, respec-

Tabla 2. Valores de significancia obtenidos para los análisis univariado y bivariado realizados.

Variable	Unidades para cada valor de significancia				
	P=0.05	P=0.01	P=0.001	P=0.0001	No significativo
AQ	6877	18 867	1327	2233	17 299
AQ-AA	4632	20 284	3162	8115	10 410
AQ-AF	5364	6383	5929	18 561	10 366
AQ - AP	178	292	16 931	0.00	29 202
AQ-BAF	15 446	3098	6192	0.00	21 867

AQ = área quemada; AQ-AA= área quemada-área agrícola; AQ-AF = área quemada-área forestal; AQ-AP = área quemada – área poblada; AQ-BAF= área quemada – borde agrícola forestal.

Fuente: elaboración propia.

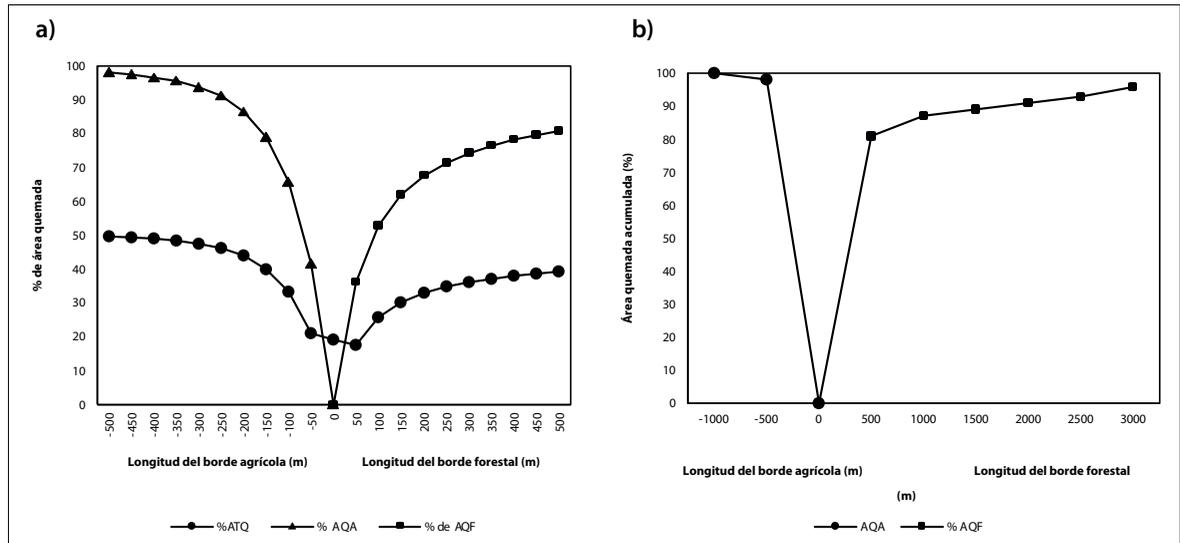


Figura 3. A) área quemada a cada 50 m de longitud de borde en áreas agrícolas y forestales; b) área quemada a cada 500 m longitud de borde. ATQ es el área total quemada, AQA es área quemada agrícola, AQF área quemada forestal. Fuente: elaboración propia.

tivamente, la relación más alta entre área quemada y superficie del borde (Figura 4a). En el área de borde agrícola (ABA) la mayor concentración de área quemada ocurre de cero a 100 m de longitud de borde (Figura 4a).

En los primeros 500 m del borde forestal anualmente se quema el 13.6% del área de borde forestal

(ABF). Posterior a esa longitud, se identificó una disminución gradual en la concentración. En las longitudes de borde de 2500 y 3000 m se incrementa la superficie y porcentaje de borde quemado; por efecto de la quema de pradera de alta montaña por incendios que mantienen continuidad espacial con el estado de Puebla.

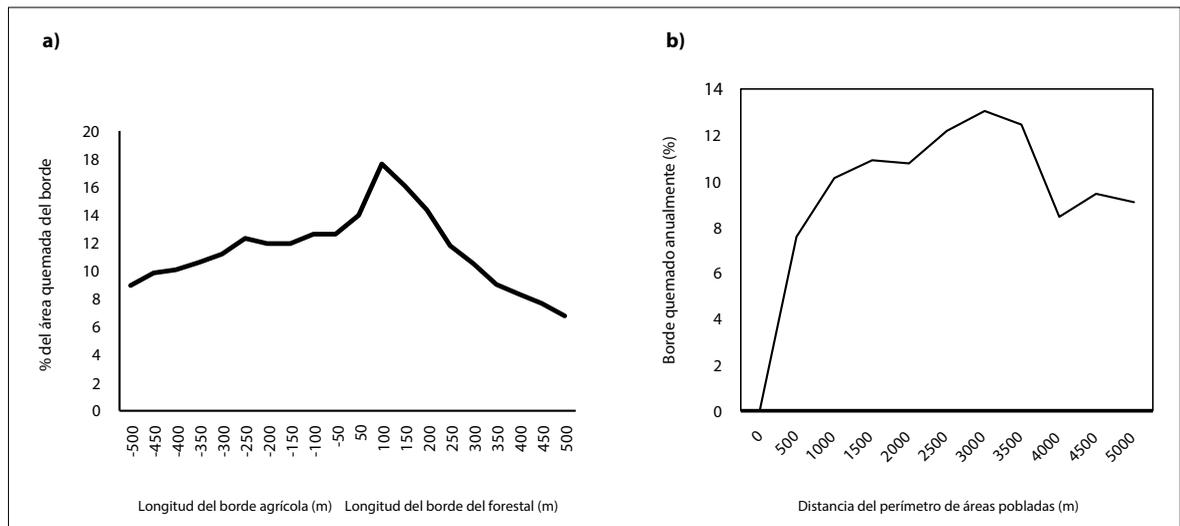


Figura 4. A) comportamiento de la relación área quemada/área de borde, a partir del borde agrícola-forestal; b) comportamiento del área quemada (%) a partir del perímetro de las áreas pobladas. Fuente: elaboración propia.

Distancia a áreas pobladas

El área acumulada quemada aumenta con la distancia a los perímetros de las áreas pobladas, alcanzando la superficie quemada máxima a 2 500 m (Figura 4b), y la mayor proporción área quemada/área del borde es a 3000 m con el 13%. En las localidades donde las áreas forestales están más próximas a las áreas pobladas y más fragmentadas esta distancia es menor. El área quemada en el uso de suelo agrícola aumenta gradualmente hasta los 2500 m de distancia del perímetro de las localidades, y posteriormente declina a la par del área agrícola. En las áreas forestales, el área quemada aumenta hasta los 3500 y posteriormente declina.

Autocorrelación bivariada con el borde agrícola-forestal

El análisis bivariado entre áreas quemadas y el borde agrícola-forestal tiene un Índice de Moran de 0.135. Este valor confirma que las áreas quemadas están vinculadas espacialmente con el borde agrícola-forestal. Los valores alto-alto se concentraron en la periferia del ANP, de Contla a San Pablo del Monte, y de Canoa hasta Ixtenco, en el resto del territorio es menos notable. Visualmente se encontró una alta coincidencia espacial entre los conglomerados altos-altos de área quemada y el borde agrícola-forestal, y los valores bajo-bajo con

las áreas núcleo de parches forestales y agrícolas (Figura 5b).

Propiedad de la tierra

En el PNLM anualmente se quema el 9.46% del territorio, el 10.15% de la superficie agrícola y el 9.96% de la forestal, de acuerdo con la cartografía indicada en los análisis. La superficie ejidal del PNLM son 11 327.72 ha, el 24.55% del parque, y concentra 6226.35 ha quemadas, el 28.51% del área quemada acumulada. En términos porcentuales se quema más la superficie ejidal que la ubicada fuera de los ejidos. El área ejidal está compuesta en un 63.38% de área agrícola y el 33.62% del área forestal; el área quemada ejidal agrícola es el 60.84% y la forestal el 38.47% del total. Anualmente se quema el 10.55% de la superficie agrícola y el 12.57% de la superficie forestal. Los ejidos se ubican en la periferia del PNLM y concentran las tierras agrícolas, es decir, la concentración del fuego puede deberse a su ubicación y el uso de la tierra más que a la propiedad.

De los 32 ejidos, siete acumulan el 78.73% de la superficie ejidal quemada (Amozoc, San Miguel Canoa, San José Teacalco, San Pedro Muñoztla, San Pablo Zitlaltepec, Tepatlaxco de Hidalgo y Santa María Acajete. Sin embargo, si se consideran los siete ejidos con mayor superficie forestal quemada,

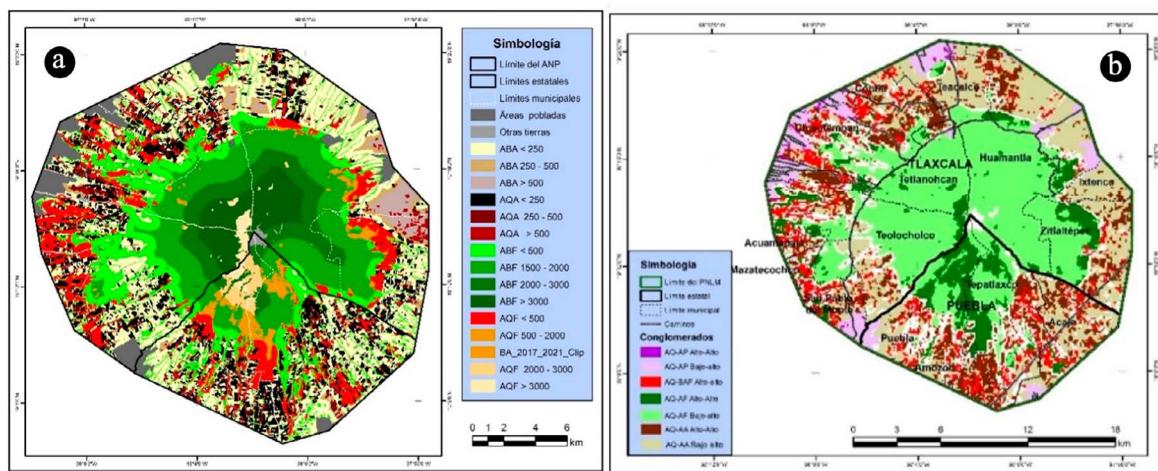


Figura 5. A) áreas quemadas agrícolas (AQA) y forestales (AQF) a diferentes longitudes del borde agrícola (BA) y forestal (BF); b) resultados de los conglomerados de los cuatro análisis bivariados mostrando los vínculos. Área quemada (AQ), área poblada (AP), BAF (Borde Agrícola-forestal), área forestal (AF), AA (área agrícola). Fuente: elaboración propia.

los de mayor relevancia son Amozoc, San Miguel Canoa, San Pedro Muñoztla, San José Teacalco, San Juan Tepulco, Santa María Acajete y Tepatlaxco de Hidalgo. En el ejido San Pedro Muñoztla el fuego se dispersa hacia las zonas forestales, y la forma de las áreas quemadas se aproximan a los límites del ejido, lo que fue ratificado por la autoridad local. Mientras que en San José Teacalco el área quemada es agrícola en mayor medida, y el área forestal quemada son remanentes de áreas forestales inmersas en áreas agrícolas; es decir, hay pocas fugas hacia el área forestal compacta. Los pastores indicaron que tienen normas locales para quemar áreas agrícolas y han tomado medidas de control para el combate del fuego. En Canoa se quema más el área ejidal que el área que no lo es, aspecto señalado por los guías de campo. En Amozoc el fuego es muy socorrido para limpiar las parcelas sin medidas preventivas.

DISCUSIÓN

El valor del índice de Moran Global 0.748 indica que la distribución del área quemada en el Parque Nacional La Malinche no es aleatoria, sino que corresponde a fenómenos altamente auto correlacionados en el espacio geográfico (Anselin, 2020; Siabato y Guzmán-Manrique, 2019). Estudios previos, como los de Parisien et al. (2006) en Canadá, Yang et al. (2007) en Missouri y Flores-Garnica et al. (2021), en San Luis Potosí, reportan que las ubicaciones de los incendios están agrupadas espacialmente. Pérez-Verdín et al. (2013), al aplicar el índice de Moran obtuvieron valores de 0.84 y 0.74 para longitud y latitud, respectivamente, y Ávila-Flores et al. (2010) obtuvieron valores de 0.9834 y 0.9832, ambos en Durango.

En relación a la ubicación de los incendios forestales, Wong y Villers (2007) en el PNLM encontraron diferencias en el contenido de humedad de los combustibles y la orientación de las laderas: al norte son más húmedas y frías, las situadas al sur son más secas y cálidas. Agregan que la ocurrencia de incendios puede ser muy alta en las comunidades de *Pinus*, por su vulnerabilidad, su localización y por los combustibles con bajos contenidos de

humedad. Los pinares ocupan el 35.24% de la superficie del parque, de acuerdo a los inventarios forestales estatales (CONAFOR, 2013, 2014), pero amplias extensiones de esta vegetación ubicada en el área compacta de Tlaxcala no se quema tan frecuentemente, y el fuego no se limita a la cara sur del parque por lo que estos aspectos son insuficientes para explicar lo encontrado en este estudio. Los valores atípicos (altos-bajos) dentro de las áreas compactas pueden ser pequeños incendios sofocados de forma casi inmediata (Gaither *et al.*, 2011); en campo, en dichos puntos, se observaron fogatas en veredas de turistas y personas locales, lo que también es indicado por Wong y Villers (2007).

Sobre la relación positiva entre áreas quemadas y áreas agrícolas Monjarás-Vega *et al.* (2020) encontraron que la densidad de la interfase agrícola muestra una relación principalmente positiva con la ocurrencia de incendios de origen humano. Flores-Garnica *et al.* (2021) sugieren que las quemas están relacionadas con la expansión de áreas agrícolas y ganaderas, lo que no se identificó en este estudio.

En el PNLM los agricultores tradicionalmente queman los residuos agrícolas para limpiar el suelo y al salirse de control se propaga a áreas boscosas (Wong y Villers, 2007). Ríos y Raga (2018) indican que en las sierras templadas del centro de México las principales áreas quemadas corresponden a tierras de cultivo de maíz, lo que coincide con lo observado en campo. Sin embargo, no se quema el rastrojo como lo señalan la Comisión para la Cooperación Ambiental (2014) y Reyes *et al.* (2013), sino en mayor medida la maleza, particularmente la planta llamada acahual (*Simsia amplexicaulis* (Cav.) Pers) que no es palatable al ganado.

En Canoa, Puebla, los guías de campo indicaron que en décadas anteriores se usó el sotobosque como pradera hasta el páramo (>4000 msnm); por las medidas de protección del ANP se abandonaron las actividades productivas, la inseguridad aumentó, la población envejeció, y prosperó el material fino en áreas abiertas (combustible ligero), lo que se corroboró en recorridos de campo. En relación con esto, Moreira *et al.* (2011) refieren que tras el abandono de las zonas rurales, los patrones espaciales formados son de alta combustibilidad al aumentar significativamente la disponibilidad y

contigüidad de las cargas de combustible. En áreas quemadas de Teolocholco, próximas a los bosques, hay surcos en la tierra lo que evidencia que fueron cultivadas en tiempo reciente. Ello podría tener lugar por los ciclos de descanso-cultivo de la tierra, el éxodo rural, el envejecimiento de la población, la precarización de la agricultura y que la población optó por actividades de mayor rentabilidad en la zona industrial metropolitana Puebla-Tlaxcala, lo que lleva a la pérdida de conocimientos culturales del uso del fuego.

Por otra parte, en recorridos de campo se observaron parcelas agrícolas quemándose sin brechas cortafuego, ni personas vigilando en seis quemas activas de siete encontradas, condiciones que favorecen la dispersión del fuego, lo que también es señalado por Rodríguez y Mendoza (1992). También se observó que los pobladores usan el fuego para renovar pastizales en pequeñas áreas adyacentes a la parcela, metepantles y orillas de caminos, mismos que al estar interconectados permiten que el fuego se extienda. El pastoreo se observó con mayor intensidad en campos de cultivo en las localidades Altamira y Pilares del municipio de Huamantla.

La relación aleatoria entre el área quemada y las áreas forestales pueden explicarse considerando que los incendios se concentraron en los bosques de coníferas y robles. Alva-Álvarez *et al.* (2018) encontraron que, a mayor homogeneidad del paisaje y número y área de parches de pinos y robles, aumenta el área del polígono incendiado, lo que también es señalado por Moreira *et al.* (2011) y Parisien *et al.* (2006). Coincidentemente, Wong y Villers (2007) señalan que en el PNLN el 41% de los incendios forestales se distribuyen en los bosques de *Pinus* y *Quercus*. Los inventarios forestales estatales y de suelos indican que el 92.19% de la vegetación del parque son bosques de pino y encino (CONAFOR, 2013, 2014), lo que implica especies adaptadas al fuego y altamente inflamables, sin embargo no se queman con la misma frecuencia. Los incendios forestales en el municipio de Puebla tienen mayor tamaño y alcanzan zonas lejanas de los bordes agrícolas y altas de la montaña, lo que puede explicarse porque la vegetación está compuesta por árboles jóvenes dispersos y en el sotobosque hay

combustible superficial ligero continuo hasta la pradera de alta montaña. Al respecto, Yang *et al.* (2007) señalan que el combustible, la topografía y la dinámica de la vegetación pueden ser relevantes en la ocurrencia y propagación de incendios causados por humanos. En la zona forestal afectada de Huamantla, Zitlaltepec e Ixtenco, durante la etapa de cultivo agrícola, el ganado pastorea en el sotobosque, por lo que el fuego se usa durante la temporada seca para favorecer el rebrote del pasto, lo que fue indicado por el personal de la caseta de vigilancia 5 del PNLN. En el estado de Tlaxcala, aproximadamente en la cota de los 3000 msnm hay una importante cantidad de brechas cortafuego y actividades preventivas, lo que impide la dispersión del fuego hacia el área compacta que no se quemó durante el periodo de estudio (bajos-bajos); esto no se observó en Puebla.

La relación negativa entre las áreas quemadas y las áreas pobladas coincide con lo indicado por Monjarás-Vega *et al.* (2020), quienes encontraron una relación negativa con la vecindad inmediata de las áreas urbanas más densamente pobladas en la región central del país, lo que se atribuye a una reducción del consumo de combustible, menor actividad agrícola en ese entorno más urbano, mayores niveles de detección y supresión de incendios, mayor interrupción de la continuidad del combustible, y probablemente a las normas locales de uso del fuego por aspectos de salud pública. Carrillo *et al.* (2012) observaron mayor probabilidad de incendios forestales en regiones con más baja densidad de localidades. Monjarás-Vega *et al.* (2020) indica que entre los primeros 10 y 15 km próximos a carreteras y áreas urbanas, ocurre la mayor parte de los incendios en México, distancia considerablemente mayor a lo encontrado. Sin embargo, en este estudio se consideran poblaciones muy pequeñas y la escala geográfica del trabajo es distinta.

En relación con la concentración de área quemada próxima al borde agrícola-forestal, Cochrane (2001) encontró en la selva amazónica que el efecto de borde es de 180 y 270 m, donde ocurre el 75% de los bosques quemados. De modo semejante a este estudio, encontró que más del 90% de los bosques quemados se asociaron a bordes del bosque y la mayor área de bosque quemado ocurrió dentro

de los 500 m. Yang *et al.* (2007) encontraron una alta probabilidad de ocurrencia de incendios en bosques accesibles a humanos, ubicados hasta a 500 m de caminos, distancia similar a la longitud del borde agrícola-forestal identificada en este estudio. Cochrane (2001) señala que a medida que los bosques se fragmentan el bosque restante se asocia con los bordes cercanos y aumenta la posibilidad de que se quemen, lo que explica lo encontrado en ciertas partes del ANP.

La concentración de área quemada en la frontera agrícola-forestal puede explicarse a partir de la coincidencia de factores naturales y humanos. Rodríguez *et al.* (2008) señalan que la variable explicativa superficie de área perturbada tiene un efecto positivo con la superficie afectada por incendios. Asimismo, Rodríguez *et al.* (2011) hallaron que, en las áreas incendiadas del sureste de México previamente afectadas por el huracán Dean, a mayor perímetro de áreas agropecuarias, mayor probabilidad de incendio. De modo semejante, Monjarás-Vega *et al.* (2020) refieren que las relaciones entre puntos altos de densidad de carbono y ocurrencia de incendios coinciden con niveles intermedios de cubierta arbórea, donde hay disponibilidad de combustible fino. Los combustibles delgados son más frecuentes en zonas perturbadas de borde forestal, donde también se presentan las fuentes de ignición por el uso del fuego en áreas agrícolas próximas. Las áreas forestales aportan semillas, humedad y protección a las plantas para colonizar áreas agrícolas cercanas, aumentando el volumen de combustible e incrementando la necesidad de usar el fuego para limpiar las zonas agrícolas.

La creación de los ejidos implicó la movilización de las personas a otras regiones con nuevas condiciones ambientales y la pérdida de conocimientos culturales, lo que implicó más incendios por causas agropecuarias que en el caso de las tierras comunales, donde la gente no fue cambiada de lugar y contribuyó a conservar mejor sus conocimientos ancestrales, incluidos los de uso del fuego (Pyne, 2024). Esta situación no se observó en el parque, los ejidos con mayor superficie quemada son, en su mayoría, poblaciones nahuas nativas que fueron dotadas de tierras ejidales, las tierras no asignadas por la Federación también son manejadas por

miembros de las localidades con un esquema local de asignación de tierras que se asemeja a la propiedad privada. En las tierras ejidales prevalece el uso colectivo, por lo que la situación pudiera explicarse por la teoría de los bienes comunes, la gobernanza y, probablemente, las repercusiones de la nueva ruralidad.

El límite del fuego se aproxima a las carreteras (pavimentadas) que están sobre dicha cota en forma discontinua; sin embargo, el patrón de quema no se modifica por la discontinuidad de la carretera perimetral que va de Canoa, Puebla a Huamantla, Tlaxcala, en el 50% del perímetro de la zona arbolada. En los mapas se puede apreciar que hay áreas específicas que obedecen a límites territoriales de carácter estatal (Puebla-Tlaxcala), municipales (Amozoc, Chiautempan, Huamantla) y locales (Muñoztla, Altamira, Pilares y el Ejido Amozoc). Probablemente por la escala de trabajo de este estudio, las carreteras principales y pavimentadas no estén directamente vinculadas con el patrón encontrado tal como refieren Carrillo *et al.* (2012), Monjarás-Vega *et al.* (2020) y Pérez-Verdín *et al.* (2013). La línea ubicada a una longitud de 500 m del borde agrícola-forestal tiene ajuste favorable al patrón de área quemada en áreas forestales, con excepción del estado de Puebla, donde sobrepasa la longitud de 3000 m (Figura 5a y 5b) lo que sugiere la relevancia de las unidades administrativas en la manifestación territorial del fuego.

Ríos y Raga (2018) señalan que la variación del fuego depende de la evolución de los factores que controlan la ignición, propagación y extinción. Se reconoce la relevancia del combustible y su humedad como variables explicativas, sin embargo, resultaron insuficientes para explicar el patrón encontrado en el PNLM, donde el fuego está supeditado a factores de ignición y prevención humana. Parisien *et al.* (2006) indican que los factores naturales, los antrópicos y la escala de estudio determinan los resultados del análisis de los patrones del paisaje de los incendios forestales, esto último explica los resultados encontrados y las diferencias respecto a otras investigaciones. Monjarás-Vega *et al.* (2020) señalan que el factor limitante de los patrones espaciales de la ocurrencia de incendios forestales en México son las igniciones

humanas y las limitaciones de combustible parecen ser secundarias.

CONCLUSIONES

El patrón de distribución del fuego en el PNLM no es aleatorio, hay tendencia a la agrupación; se identificó la concentración de áreas quemadas y la exclusión del fuego. Se encontró autocorrelación espacial positiva con áreas agrícolas, aleatoria con áreas forestales y negativa con áreas pobladas. Los conglomerados no quemados están vinculados en mayor medida con áreas forestales compactas y áreas pobladas, los quemados con áreas agrícolas y el borde agrícola-forestal.

La parte central-alta del Parque Nacional La Malinche no está fragmentada por actividades antropogénicas, a menor altitud predominan las actividades agrícolas con parches de vegetación forestal en cañadas, vaguadas o escurrimientos. En el borde agrícola-forestal se concentra el fuego del PNLM, por su uso en áreas agrícolas y condiciones favorables para su dispersión hacia el interior de áreas forestales. La superficie quemada no se presenta de forma inmediata en las áreas pobladas, se incrementa de forma gradual hasta los 2500 m, la concentración más alta es a 3000 m.

La distribución del fuego mantiene cierta homogeneidad en el parque vinculada con la agricultura y los bordes; sin embargo, esto no se mantiene al cruzar los límites estatales. Las diferencias entre los estados de Puebla y Tlaxcala sugieren que el marco territorial estatal es relevante en la forma en que ocurre el fuego en el PNLM. En las áreas de interfaz agrícola se debe fortalecer la organización a nivel comunitario o local para generar o recuperar capacidades en el uso y manejo del fuego por las condiciones de la agricultura tradicional y la proximidad a bosques prioritarios con regímenes de fuego específicos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo económico del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)

para realizar los estudios de posgrado, así como la formación académica otorgada por el Colegio de Posgraduados. Al Dr. Ángel Bustamante González por el apoyo y recomendaciones durante el desarrollo de este trabajo de investigación. Y a las personas de campo que colaboraron en los recorridos por el Parque.

REFERENCIAS

- Alva-Álvarez, G. I., Reyes-Hernández, H., Palacio-Aponte, Á. G., Núñez-López, D., y Muñoz-Robles, C. (2018). Cambios en el paisaje ocasionados por incendios forestales en la región de Madera, Chihuahua. *Madera y Bosques*, 24(3), 1-15. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2431697>
- Anselin, L. (1995). Local Indicators of Spatial Association—LISA. *Geographical Analysis*, 27(2), 93-115. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x>
- Anselin, L. (2019). Global spatial autocorrelation (2) bivariate, differential and EBR rate Moran Scatter Plot. En *GeoDa an introduction to spatial data analysis*. https://geodacenter.github.io/workbook/5b_global_adv/lab5b.html
- Anselin, L. (2020). Global spatial autocorrelation (1); visualizing spatial autocorrelation. En *GeoDa an introduction to spatial data analysis*. http://geodacenter.github.io/workbook/5a_global_auto/lab5a.html
- Ávila-Flores, D. Y., Pompa-García, M., y 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*, XVI(2), 253-260. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2009.08.028>
- Buzai, D. G., y Montes, G. E. (2021). *Estadística espacial: fundamentos y aplicación con sistemas de información geográfica* (Primera). Universidad de Luján. https://www.researchgate.net/publication/357001572_Estadística_Espacial_Fundamentos_y_aplicacion_con_Sistemas_de_Informacion_Geografica
- Carrillo, G. R. L., Rodríguez Trejo, D. A., Tchikoué, H., Monterroso Rivas, A. I., y Santillan Pérez, J. (2012). Análisis espacial de peligro de incendios forestales en Puebla, México. *Interciencia*, 37(9), 678-683. <https://www.redalyc.org/pdf/339/33925502012.pdf>
- Cochrane, M. A. (2001). Synergistic interactions between habitat fragmentation and fire in evergreen tropical forests. *Conservation Biology*, 15(6), 1515-1521. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2001.01091.x>
- Comisión para la Cooperación Ambiental. (2014). La quema de residuos agrícolas: fuente de dioxinas. *Comisión para la Cooperación Ambiental. Mon-*

- treal, Canadá. <http://www3.cec.org/islandora/en/item/11405-la-quema-de-residuos-agr-colas-es-una-fuente-de-dioxinas-es.pdf>
- CONAFOR. (2013). *Inventario Estatal Forestal y de Suelos Puebla*. CONAFOR. Texcoco, Estado de México. 207 p.
- CONAFOR. (2014). *Inventario Forestal y de Suelos del Estado de Tlaxcala*. CONAFOR.
- CONANP. (2013). *Programa de Manejo Parque Nacional la Montaña Malinche o Matlalcuéyatl*. CONANP.
- Flores-Garnica, J. G., Gisela, A., y Oscar, R. (2021). *Time-space relationship between hotspots and agricultural and forest surface areas in San Luis Potosí State, México*. 12(64). <https://doi.org/https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i64.857>
- Frausto Leyva, J. M. (2006). El programa de prevención de incendios FMCN-USAID. En J. G. Flores Garnica y D. A. Rodríguez-Trejo (Eds.), *Incendios forestales, definiendo el problema, ecología y manejo, participación social, fortalecimiento de capacidades, educación y divulgación* (pp. 85-96). CONAFOR-Mundi Prensa.
- Gaither, C. J., Poudyal, N. C., Goodrick, S., Bowker, J. M., Malone, S., y Gan, J. (2011). Wildland fire risk and social vulnerability in the Southeastern United States: An exploratory spatial data analysis approach. *Forest Policy and Economics*, 13(1), 24-36. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2010.07.009>
- González-Gutiérrez, I., Mas-Causel, J. F., Morales-Manilla, L. M., y Ocegüera-Salazar, K. A. (2019). Thematic accuracy of hotspots and wildfires in Michoacán, Mexico. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 26(1), 17-35. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2019.01.011>
- INEGI. (2020). *Marco Geoestadístico Nacional*. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463807469>
- Korontzi, S., McCarty, J., Loboda, T., Kumar, S., y Justice, C. (2006). Global distribution of agricultural fires in croplands from 3 years of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data. *Global Biogeochemical Cycles*, 20(2). <https://doi.org/10.1029/2005GB002529>
- Monjarás-Vega, N. A., Briones-Herrera, C. I., Vega-Nieva, D. J., Calleros-Flores, E., Corral-Rivas, J. J., López-Serrano, P. M., Pompa-García, M., Rodríguez-Trejo, D. A., Carrillo-Parra, A., González-Cabán, A., Alvarado-Celestino, E., y Jolly, W. M. (2020). Predicting forest fire kernel density at multiple scales with geographically weighted regression in Mexico. *Science of the Total Environment*, 718. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137313>
- Moreira, F., Viedma, O., Arianoutsou, M., Curt, T., Koutsias, N., Rigolot, E., Barbati, A., Corona, P., Vaz, P., Xanthopoulos, G., Mouillot, F., y Bilgili, E. (2011). Landscape - wildfire interactions in southern Europe: Implications for landscape management. *Journal of Environmental Management*, 92(10), 2389-2402. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.028>
- Myers, R. L. (2006). *Convivir con el fuego, manteniendo los ecosistemas y los medios de subsistencia mediante el manejo integral del fuego*. Tallahassee, Florida. <http://nature.org/fire>, <http://tncfuego.org>.
- Parisien, M. A., Peters, V. S., Wang, Y., Little, J. M., Bosch, E. M., y Stocks, B. J. (2006). Spatial patterns of forest fires in Canada, 1980-1999. *International Journal of Wildland Fire*, 15(3), 361-374. <https://doi.org/10.1071/WF06009>
- Pérez-Verdín, G., Márquez-Linares, M. A., Cortés-Ortiz, A., y Salmerón-Macías, M. (2013). Análisis espacio-temporal de la ocurrencia de incendios forestales en Durango, México. *Madera y Bosques*, 19(2), 37-58. <https://doi.org/10.21829/myb.2013.192339>
- Pyne, S. J. (2024). *Five Suns. A Fire History of Mexico*. The University of Arizona Press.
- RAN. (13 de febrero de 2020). *Datos geográficos perimetrales de los núcleos agrarios certificados, por el estado-formato shape*. RAN. <https://datos.gob.mx/busca/dataset/datos-geograficos-perimetrales-de-los-nucleos-agrarios-certificados-por-estado-formato-shape>
- Reyes, M.L., Camacho, V. T., y Guevara, H. F. (2013). *Rastrojos. Manejo, uso y mercado en el Centro y Sur de México*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Ríos, B., y Raga, G. B. (2018). Spatio-temporal distribution of burned areas by ecoregions in Mexico and central America. *International Journal of Remote Sensing*, 39(4), 949-970. <https://doi.org/10.1080/1431161.2017.1392641>
- Rodríguez T. D. A., y Mendoza B. M. A. (1992). Incendios forestales provocados. *Agrociencia serie recursos naturales renovables*, 2(April), 75-85. https://www.researchgate.net/publication/349226670_Incendios_forestales_provocados.
- Rodríguez-Trejo, D. A., y Fulé, P. Z. (2003). Fire ecology of Mexican pines and a fire management proposal. *International Journal of Wildland Fire*, 12(1), 23-37. <https://doi.org/10.1071/WF02040>
- Rodríguez, T. D. A., Ramirez, M. H., Tchikoué, H., y Santillan-Perez, J. (2008). Factores que inciden en la siniestralidad de los incendios forestales. *Revista ciencia forestal en México*, 33(104), 37-58. <http://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/736/1898>
- Rodríguez-Trejo, D. A., Tchikoué, H., Cíntora-González, C., Contreras-Aguado, R., de la Rosa Vázquez, A.

- (2011). Modelaje del peligro de incendio forestal en las zonas afectadas por el huracán Dean. *Agrociencia* 45: 593-608.
- SEMARNAT. (13 de diciembre de 2022). *Causas de los incendios forestales*. http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_RFORESTA05_04&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce&NOMBREANIO=*
- Siabato, W., y Guzmán-Manrique, J. (2019). La autocorrelación espacial y el desarrollo de la geografía cuantitativa. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 28(1), 1-22. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v28n1.76919>
- SIAP. (3 de febrero de 2021). *Frontera agrícola III*. SIAP. <https://nube.siap.gob.mx/index.php/>, acceso restringido
- Villers Ruíz, L., y López Blanco, J. (2004). Comportamiento del fuego y evaluación del riesgo por incendios en las áreas forestales de México: un estudio en el volcán la Malinche. En *Incendios forestales en México Métodos de evaluación* (pp. 57-74). <https://www.atmosfera.unam.mx/wp-content/uploads/2021/09/Incendios-forestales.pdf>
- Wong González, J. C., y Villers Ruiz, M. L. (2007). Evaluación de combustibles y su disponibilidad en incendios forestales: Un estudio en el Parque Nacional la Malinche. *Investigaciones Geográficas*, 62, 87-103. <https://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n62/n62a6.pdf>
- Yang, J., He, H. S., Shifley, S. R., y Gustafson, E. J. (2007). Spatial patterns of modern period human-caused fire occurrence in the Missouri Ozark Highlands. *Forest Science*, 53(1), 1-15. <https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/19477>