

# Incendios forestales: autocorrelación espacial de topografía y temporalidad

JAIME SIMENTAL ÁVILA\*, MARÍN POMPA GARCÍA \*

En México, los incendios forestales, una de las principales causas de grandes pérdidas económicas y ecológicas,<sup>1</sup> tienen una clara manifestación territorial,<sup>2</sup> ya que los factores y efectos se distribuyen en el espacio y en el tiempo. Con esto en consideración, se posibilita conocer y entender los patrones de distribución espacial mediante la aplicación de métodos cuantitativos de geostatística. Dichas técnicas permiten detectar y describir tales tendencias, así como evaluar hipótesis sobre si el fenómeno observado sigue una distribución territorial correlacionada (es decir, aglomerada o dispersa) o aleatoria.

El análisis espacial derivado de los sistemas de información geográfica (SIG), constituye una serie de técnicas estadísticas y matemáticas aplicadas al estudio de datos distribuidos geoespacialmente.<sup>3</sup> Notables esfuerzos se han emprendido en la búsqueda de respuestas sobre el arreglo espacial de los datos geográficos.<sup>4</sup>

La autocorrelación espacial<sup>4</sup> (AE) se define como la medida cuantitativa de la concentración o dispersión de los valores de una variable en un mapa. Con ella es posible determinar el grado en que los datos espaciales de una unidad geográfica son similares a otros en unidades geográficas próximas.

En el norte y occidente de México se han realizado estudios sobre la tendencia geográfica de los incendios forestales;<sup>5,6</sup> sin embargo, el análisis sobre las variables topográficas que caracterizan a las zonas donde se presentan, se han omitido. Además, la época de estiaje es un tema de gran importancia, ya que guarda relación directa con el número de incendios; sin embargo, hasta ahora no se ha documentado geostatísticamente.

Por lo anterior, el objetivo de este trabajo es determinar la AE de las variables topográficas: altitud, pendiente y exposición; así como las de temporalidad de ocurrencia anual y mensual. Como hipótesis se plantea la existencia de un patrón espacial que caracterice la distribución de los incendios en función de tales variables.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El estado de Durango, ubicado en el noroeste de México (figura 1), con coordenadas 22° 16' y 26° 53' Norte, 102° 29' y 107° 16' Oeste, y cubre una superficie de 123.181 km<sup>2</sup>.<sup>5</sup>

Cuenta con una gran diversidad topográfica, lo que lo hace importante para estudiar la variabilidad espacial de la ocurrencia de los incendios, y su extensión territorial permite ver el papel de los propietarios de los terrenos forestales en la prevención, control y combate de incendios forestales.<sup>6</sup>

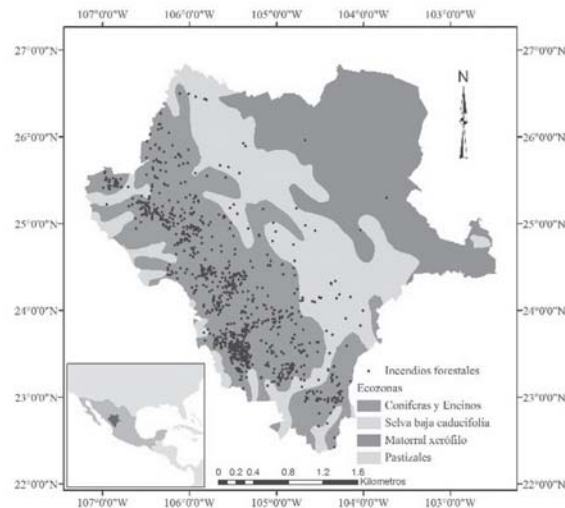


Fig. 1. Ubicación del área de estudio e incendios forestales ocurridos durante 2001 a 2010 para el Estado de Durango.

\*Universidad Juárez de Estado de Durango.  
contacto: mpgarcia@ujed.mx

## Base de datos

Se dispuso de los reportes de incendios forestales de la Comisión Nacional Forestal registrados en el estado para un periodo de 10 años (2001-2010) en formato *shapefile*, con coordenadas geográficas, altitud, exposición topográfica, pendiente, mes de inicio y año de ocurrencia de los incendios.

Dichos datos se introdujeron para detectar y medir la AE, a través del Índice de Moran.<sup>7</sup> Este estadístico varía entre +1 y -1, donde +1 indica una correlación positiva perfecta o perfecta concentración, -1 indica una correlación negativa perfecta o perfecta dispersión, y el 0 indica un patrón espacial totalmente aleatorio:

$$I = \frac{N \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \quad (1)$$

Donde  $X_i$  e  $X_j$  son los valores que toma la variable  $X$  en los puntos  $i$  y  $j$ ,  $N$  es el número de datos, y  $W_{ij}$  es el peso de la clase de distancia  $d$ , que puede valer  $W_{ij} = 1$  si el punto  $j$  está dentro de la clase de distancia  $d$  medida a partir del punto  $i$ , o  $W_{ij} = 0$  si no se cumple dicha condición:<sup>8</sup>

$$W_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } d_{ij} \leq d \\ 0 & \text{si } d_{ij} > d \end{cases} \quad (2)$$

En el cociente de (1), el numerador es un término que muestra la covarianza, mientras que el denominador indica la varianza, lo que hace un diseño similar al coeficiente de correlación de Pearson;<sup>9</sup> sin embargo, en el primero la asociación de valores del conjunto de datos es determinado por una matriz de distancias (2) o contigüidad que predefine los valores vecinos (los valores para el cómputo del coeficiente). Es decir, los pesos  $W_{ij}$  deciden la proximidad de cada punto analizado.

Se utilizó el software GeoDa<sup>10</sup> para el cálculo del Índice de Moran de las variables mencionadas anteriormente, y dado que el índice proporciona la medida de la correlación entre los valores vecinos en un patrón, la vecindad de las unidades espaciales de incendios se determinó con la distancia euclidiana.

Como instrumento gráfico de análisis de la AE, se utilizó el diagrama de dispersión de Moran, el cual estandariza la variable a analizar y se obtiene el retardo espacial de dicha variable, representándose ambos valores en un eje cartesiano en el que la pendiente de la recta de regresión es el valor del estadístico de Moran de AE global, de forma que cuanto ma-

yor sea el ángulo que forme ésta con el eje de abscisas, más fuerte será el grado de AE y viceversa.<sup>10</sup> Complementariamente, se utilizó el indicador local de asociación espacial LISA (Local Indicator of Spatial Association), cuyo objetivo es que el estadístico obtenido para cada sección suministre información acerca de la relevancia de valores similares alrededor de la misma. Se generaron mapas temáticos de agrupamiento (*clusters*), para identificar visualmente las zonas donde se agrupan las características con mayor AE.

## RESULTADOS

Durante el periodo analizado (2001-2010) se registraron 1,004 incendios en el estado, los meses de mayor ocurrencia fueron abril y mayo, con 245 y 475, respectivamente (figura 2).

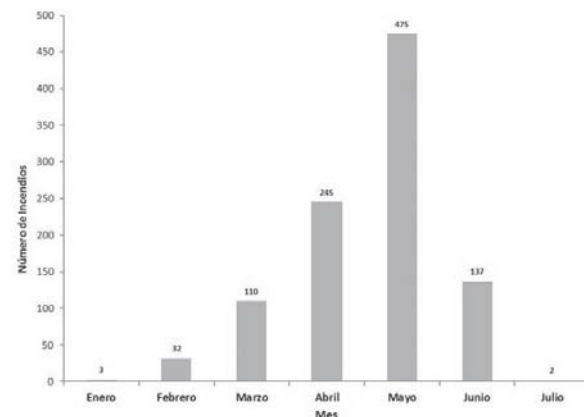


Fig. 2. Incendios por mes durante los años 2001 a 2010 para el estado de Durango.

El análisis espacial, mediante el Índice de Moran, permitió estimar un coeficiente de AE, que se mide por la cercanía de los incendios entre sí. Se estimó este índice para las variables topográficas de pendiente, altitud y exposición; de igual forma, se estimó para los meses y años de inicio de los incendios.

Como resultado se obtuvieron diagramas de dispersión de Moran (figuras 3 y 4), en los que se pueden identificar zonas con presencia alta de incendios (vecindad o concentración) y de valores altos de cada variable; situación conocida como *High-High*, y que se muestra en la parte superior derecha del plano cartesiano. Sucede lo contrario en una situación *Low-Low*; es decir, presencia de valores bajos de incendios rodeados de unidades con bajo número de incendios, y se muestra en la parte inferior izquierda del plano cartesiano, o bien se dan asociaciones de valores altos e incidencias bajas y

viceversa, localizado en el cuadrante superior izquierdo e inferior derecho del plano, respectivamente.

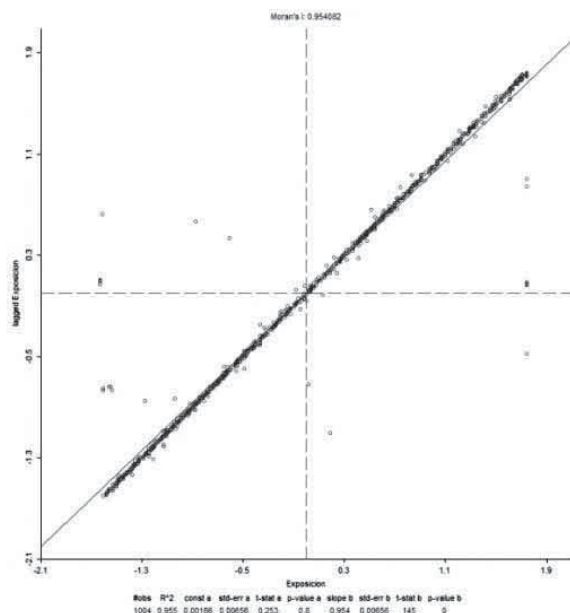


Figura 3. Diagrama de dispersión Moran para exposición topográfica para el estado de Durango.

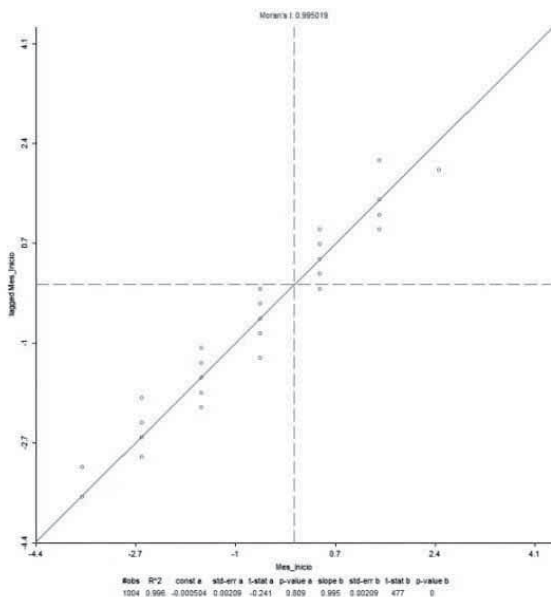


Figura 4. Diagrama de dispersión Moran para mes de inicio de incendios para el estado de Durango.

Se observó que las variables de pendiente, altitud y año de inicio no presentaron AE alguna; los valores obtenidos para el Diagrama de dispersión de Moran muestran valores cercanos a 0, situación que implica un patrón de dispersión aleatorio. Sin embargo, destacan las variables de exposición topográfica y el mes de inicio, con valores por encima del 0.95.

### DISCUSIÓN

Este es el primer trabajo que documenta la autocorrelación espacial de los incendios en función de sus variables topográficas. Esto contribuye a la generación de conocimiento para entender el manejo del fuego. De esta forma, el análisis espacial resultó una técnica útil para la investigación del fenómeno de los incendios forestales.

Se han realizado estudios de la relación entre la ubicación espacial de incendios y el grado de concentración en su ocurrencia.<sup>1,11</sup> Los resultados obtenidos por Pérez<sup>6</sup> confirmaron que el tamaño de los incendios está influenciado no sólo por factores ambientales (precipitación, temperatura y altitud), sino también por factores antropogénicos (índice de gravedad de población, distancia a caminos, distancia localidades, distancia a áreas deforestadas). Sin embargo, los aspectos topográficos no habían sido abordados bajo la perspectiva propuesta en este estudio, situación que otorga relevancia a nuestros resultados.

Algunos autores han reportado que la ocurrencia y el comportamiento de los incendios forestales<sup>11,12</sup> es por influencia de factores como: características de los combustibles, clima, tiempo atmosférico y topografía del lugar. Las variables topográficas de altitud y pendiente analizadas en este caso, no mostraron un patrón de AE; sin embargo, algunos autores han mencionado la importancia del estudio de estos factores en la ocurrencia y distribución de incendios.<sup>11,13</sup>

Otros factores importantes que inciden en la ocurrencia de los incendios son: la susceptibilidad de la vegetación al fuego, intensidad en el cambio de uso del suelo y la precipitación.<sup>1</sup> Según los resultados obtenidos en nuestro análisis, se puede afirmar que la variable topográfica de exposición y la incidencia mensual de los incendios aportan información sobre la distribución geográfico-espacial de los mismos. De esta forma, se amplía el número de variables que guardan relación con el desarrollo y distribución de los incendios. Ello resulta fundamental para los tomadores de decisión en el manejo del fuego.

Los resultados del estudio muestran que la variable topográfica de exposición y los meses de ocurrencia de incendios

presentan un valor elevado de autocorrelación espacial. Indicando que existen zonas con alta ocurrencia de incendios, y que seguramente guardan relación con alguna variable causativa.<sup>1</sup> Moreno y Vayá<sup>14</sup> indican que la dependencia o AE surge siempre que el valor de una variable en un lugar del espacio está relacionado con su valor en otro u otros lugares del espacio. Esto prueba la primera ley geográfica de Tobler,<sup>15</sup> de que todo está relacionado con todo lo demás, pero que las cosas cercanas están más relacionadas que las cosas distantes.

La exposición topográfica influye sobre la vegetación por la alteración que provoca en el efecto de variables climáticas como radiación solar, evaporación y precalentamiento de combustibles y suelo.<sup>16</sup> Nelson<sup>17</sup> y Wong<sup>13</sup> mencionan que la orientación tiene un efecto decisivo en la disponibilidad de los combustibles. En este sentido, Ávila<sup>1</sup> analizó el patrón espacial de ocurrencia de incendios forestales, mostrando que las ubicaciones de ignición no exhiben una distribución al azar. Esto concuerda con los resultados obtenidos para la exposición topográfica, que al ser un factor que influye sobre otros, produce una relación directa o indirecta entre ellos.<sup>6</sup> Dada esta situación, no se descartan esfuerzos adicionales enfocados a buscar relaciones de la topografía con la vegetación que sustentan los ecosistemas con presencia de incendios forestales.

En relación a la temporalidad de ocurrencia de los incendios que exhibieron los resultados, la Comisión Nacional del Agua<sup>18</sup> menciona que en México, 68% de la precipitación normal mensual ocurre entre junio y septiembre. Dejando un lapso entre octubre y mayo por debajo del promedio anual.<sup>19,20</sup> Esto tiene repercusiones directas en los balances hídricos del bosque. Por lo cual, Wong y Villers<sup>13</sup> mencionan que en algunos casos, la presencia de incendios durante el periodo de febrero a mayo se debe a la aplicación de fuego a la vegetación para favorecer la regeneración de pastos para la ganadería.<sup>20</sup> Esto explica por que la incidencia de los incendios forestales corresponde a las fechas de poca precipitación y de aplicación de incendios, como lo muestran nuestros resultados de AE.

Estudios como el de Ávila<sup>1</sup> permiten derivar otras interrogantes, en el sentido de evaluar la intensidad de la concentración de incendios. El propósito es detectar la correlación con las indicativas de ocurrencia, a partir de diversas variables. De tal forma que sea posible relacionar las variables que se han mencionado a lo largo de este apartado, integrándolas en un solo modelo de estudio.

Para lo anterior, es importante mencionar que el registro histórico de incendios forestales brinda un insumo necesario para estudiar su comportamiento y distribución. Si bien se

utilizó un periodo de registro de diez años, no se descarta la obtención de mejores resultados con un mayor número de registros en un mayor tiempo.

Es importante entender la ocurrencia de incendios forestales y sus factores asociados como un factor clave para diseñar estrategias de manejo del fuego. Desarrollar un modelo general que integre los esfuerzos realizados, que describa en mayor detalle la relación de características topográficas, climáticas y antropogénicas estudiadas hasta el momento, permitirá una mejor comprensión del comportamiento del fuego.

## CONCLUSIONES

El análisis espacial es una técnica que proporciona herramientas de investigación útiles para la comprensión del comportamiento y frecuencia de los incendios forestales.

Se determinó que factores topográficos y temporales, como la exposición y el mes de inicio del incendio, obedecen a un patrón de concentración espacial. Otros estudios han abordado correlaciones de factores antropogénicos y espaciales en los incendios. Sin embargo, factores de topografía y temporalidad no se habían abordado bajo la perspectiva propuesta en este caso.

Con los resultados obtenidos, se identifican las zonas y espacios temporales para realizar acciones de prevención. La metodología aplicada exhibió cierta interconexión de las variables estudiadas. No se descartan análisis subsecuentes con otras variables, lo cual permitirá no sólo el diseño de estrategias, sino de programas de prevención de incendios en las zonas susceptibles.

## RESUMEN

En el estado de Durango los incendios forestales afectan año con año la superficie de bosques. El objetivo de este estudio fue evaluar la autocorrelación espacial de variables: altitud, pendiente, exposición topográfica, meses y años de ocurrencia de los incendios. Se analizaron datos para el periodo 2001-2010, con 1,004 siniestros. Se encontró que existe autocorrelación espacial positiva con valores de 0.95 y 0.99 en el índice de Moran I para la exposición topográfica y mes, respectivamente. Ello demuestra una tendencia no aleatoria de los incendios.

**Palabras clave:** Índice de Moran, Diagramas de dispersión, Análisis geoespacial, Exposición topográfica, Sistemas de información geográfica.

**ABSTRACT**

Each year forest fires affect woodland areas in Durango State. The aim of this paper was to assess spatial autocorrelation of variables such as altitude, topographic aspect, slope, start month, and year of forest fires. Data from 2001-2010 were analyzed, with 1,004 fires recorded. Moran's index results for topographic aspect and start month indicate a positive spatial autocorrelation, with values of 0.95 and 0.99, respectively. This demonstrates a non-random trend of forest fires.

**Keywords:** Moran's index, Scatter plots, Geospatial analysis, Topographic aspect, Geographic Information Systems.

**AGRADECIMIENTOS**

Se agradece a Conafor por la disposición de datos, así como a los revisores anónimos por sus útiles revisiones.

**REFERENCIAS**

1. Ávila-Flores, D., Pompa-García, M., & Vargas-Pérez, E. (2010). Spatial analysis of forest fire occurrence in the state of Durango. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 16(2), 253-260.
2. Chuvieco E., Congalton R. (1989). Application of remote sensing and geographic information systems to forest fire hazard mapping. *Remote sensing Environment* 29:147-159. DOI: 10.1016/0034-4257(89)90023-0.
3. Buzai G.D., C.A. Baxendale. (2006). Análisis socioespacial con sistemas de información geográfica. Buenos Aires, Argentina. Lugar Editorial. 397 p.
4. Goodchild, M. (1987). A spatial analytical perspective on geographical information systems. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1, 327-334.
5. Pompa García, Marín, & Hernández González, Paulino. (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.
6. Pérez-Verdín, Gustavo; Márquez-Linares, Marco Antonio; Cortés-Ortiz, Armando; Salmerón-Macías, Maricela. (2013). Análisis espacio-temporal de la ocurrencia de incendios forestales en Durango, México. *Madera y Bosques*. 37-58.
7. Moran, P. (1950) Notes on continuous stochastic phenomena. *Biometrika*, 37:17.
8. Sokal, R.R.; Oden, N.L. (1978). Spatial autocorrelation in biology. *Biological Journal of the Linnean Society* 10: 199-228.
9. Pearson, K. (1896). Mathematical contributions to the theory of evolution: III. Regression, heredity, and panmixia. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 187: 253-318.
10. Anselin, L. (2003). *GeoDa 0.9 User's Guide*. Spatial Analysis Laboratory, University of Illinois, Urbana-Champaign, IL. 18 p.
11. Pompa-García, M., Montiel-Antuna, E. (2012). Fire Ignition Trends in Durango, México, *Global Perspectives on Sustainable Forest Management*, Dr. Dr. Clement A. Okia (Ed.), ISBN: 978-953-51-0569-5, InTech, DOI: 10.5772/32875.
12. DeBano, L. (1998), *Fire's Effects on Ecosystems*, John Wiley and Sons, Inc.
13. Wong González, Julio César, & Villers Ruiz, María de Lourdes. (2007). Evaluación de combustibles y su disponibilidad en incendios forestales: un estudio en el Parque Nacional La Malinche. *Investigaciones geográficas*, (62), 87-103.
14. Moreno, R.; Vayá-Valcarce, E. (2001). Técnicas econométricas para el tratamiento de datos espaciales: la econometría espacial. Ediciones de la Universidad de Barcelona. España. 160 pp.
15. Tobler, W. (1970). A Computer Movie Simulation Urban Growth in the Detroit Region. *Economic Geography*, 46(2), 234-240.
16. Julio, G Giroz, G. (1975). Notas sobre el comportamiento del fuego y su aplicación en el control de incendios forestales, in: *Bosque N° 1* págs. 18 a 27.
17. Nelson, R. Jr. (2001), "Water relations of Forest Fuels", en Jonson, E. and K. Miyanishi, *Forest fires, behavior and ecological effects*, Academic Press, pp. 79-149.
18. Comisión Nacional del Agua. Estadísticas del agua en México, edición 2011. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, D.F.
19. Pompa-García, M., Miranda-Aragón, L., Aguirre-Salado, C. (2014) Tree growth response to ENSO in Durango, México. *International Journal of Biometeorology*. DOI: 10.1007/s00484-014-0828-2
20. Alanis, E.; Jiménez J. "Análisis de la frecuencia de los incendios forestales en la Sierra Madre Oriental y Occidental del norte de México y sur de Estados Unidos de América." *CIENCIAUANL*, vol. 14, núm. 3, julio-septiembre, 2011, pp. 255-263.

Acceptedo: 02-02-15  
Recibido: 23-05-14