



Acta universitaria

ISSN: 0188-6266

ISSN: 2007-9621

Universidad de Guanajuato, Dirección de Investigación y
Posgrado

Farfán Gutiérrez, Michelle; Flamenco Sandoval, Alejandro; Rodríguez Padilla, Carlos Rogelio; Rodrigues de Sousa Santos, Lucas; González Gutiérrez, Ignacio; Gao, Yan

Cartografía de la probabilidad de ocurrencia a incendios forestales para el estado de Guanajuato: Una aproximación antrópica de sus fuentes de ignición

Acta universitaria, vol. 30, e2953, 2020, Diciembre

Universidad de Guanajuato, Dirección de Investigación y Posgrado

DOI: <https://doi.org/10.15174/au.2020.2953>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=41669751058>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

UAEM
redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Cartografía de la probabilidad de ocurrencia a incendios forestales para el estado de Guanajuato: Una aproximación antrópica de sus fuentes de ignición

Mapping the occurrence probability of forest fires for the state of Guanajuato: An anthropic approximation of ignition sources

Michelle Farfán Gutiérrez^{1*}, Alejandro Flamenco Sandoval¹, Carlos Rogelio Rodríguez Padilla², Lucas Rodrigues de Sousa Santos³, Ignacio González Gutiérrez⁴ y Yan Gao⁴

¹Departamento de Ingeniería Geomática e Hidráulica, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato. Avenida Juárez # 77, Zona Centro, C.P. 36000. Guanajuato, Guanajuato, México. Teléfono 473 102 0100. Correo electrónico michelle.farfán@ugto.mx

²Instituto Municipal de Planeación de la Ciudad de León, Guanajuato.

³Environmental Amazon Research Center, Brasília, Brasil.

⁴Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia.

*Autor de correspondencia

Resumen

La generación de cartografía de probabilidad a incendios es fundamental para lograr el objetivo 15 de la Agenda 2030 de la Organización de las Naciones Unidas (ONU). Se desarrolló un modelo espacial explícito para generar dicha cartografía para el estado de Guanajuato. Se integró información espacial de las variables antrópicas distancia a caminos, distancia a zonas urbanas, distancia a usos de suelo agropecuarios y distancia al borde del bosque como potenciales fuentes de ignición en el programa Dinamica EGO. El intervalo de tiempo de calibración fue 2004-2009. Se empleó el método de los pesos de evidencia para establecer la influencia de estas variables en la probabilidad de ocurrencia. Finalmente, se compararon las probabilidades obtenidas con los incendios ocurridos en el año 2017 mediante la prueba estadística curva característica operativa del receptor (ROC). Se obtuvo un valor de área bajo curva (AUC) de 0.7, que considera que el mapa es aceptable para predecir los incendios. La cartografía de susceptibilidad a incendios contribuye a la gestión para conservar los bosques y su biodiversidad.

Palabras clave: Modelación espacial; planeación territorial; variables antrópicas.

Abstract

The generation of fire probability mapping is essential to achieve the objective 15 established in the United Nations (UN) 2030 Agenda. An explicit spatial model was developed to generate fire probability maps for the state of Guanajuato. Spatial information of the anthropic variables distance to roads, distance to urban areas, distance to agricultural land uses, and distance to forest edges as potential sources of ignition was entered in the Dinamica EGO program. The calibration time interval was 2004-2009. The weight of evidence method was used to establish the influence of these variables on the probability of fire occurrence. Finally, the resulting probabilities were compared with the fires that occurred in 2017 by means of the receiving operating characteristic (ROC) statistical test. An area under the ROC curve (AUC) value of 0.7 was obtained, which considers the map to be acceptable for predicting fires. Mapping of fire susceptibility contributes to the management of forests and biodiversity conservation.

Keywords: Spatial modelling; territorial planning; anthropic variables.

Recibido: 28 de julio de 2020

Aceptado: 15 de octubre de 2020

Publicado: 11 de noviembre de 2020

Como citar: Farfán Gutiérrez, M., Flamenco Sandoval, A., Rodríguez Padilla, C. R., Rodrigues de Sousa Santos, L., González Gutiérrez, I., & Gao, Y. (2020). Cartografía de la probabilidad de ocurrencia a incendios forestales para el estado de Guanajuato: Una aproximación antrópica de sus fuentes de ignición. *Acta Universitaria* 30, e2953. doi. <http://doi.org/10.15174/au.2020.2953>

Introducción

La Organización de las Naciones Unidas (ONU) aprobó en 2015 la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, cuyo objetivo número 15 engloba la gestión sostenible de los bosques, la lucha contra la desertificación, el cese de la degradación de las tierras y la pérdida de biodiversidad. Gestionar sosteniblemente los bosques significa que el manejo de los recursos naturales debe satisfacer las necesidades de las generaciones presentes, sin comprometer las posibilidades de las generaciones futuras para atender sus propias necesidades y aspiraciones (ONU, 1987). La Agenda 2030 propone un plan de acción a largo plazo con enfoques transversales para la integralidad de las políticas de desarrollo en tres dimensiones: economía, ambiente y sociedad. En mayo de 2016, México renovó el compromiso de asumir y llevar a cabo este plan junto con los países miembros de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL, 2016). Dicho paradigma de la sustentabilidad implica, entre otras estrategias, el desarrollo de herramientas e instrumentos que apoyen la planeación local de las gestiones sostenibles de los bosques, en particular, para atender los impactos derivados de los incendios forestales y alcanzar el objetivo 15 de la Agenda 2030 de la ONU.

Se sabe que los incendios forestales son uno de los factores de perturbación ecológica y de transformación del paisaje más extendidos en los ecosistemas forestales de México (Comisión Nacional Forestal [Conafor], 2014; Gallegos, González, Cabrera, Marcelli & Hernández, 2014; Jardel et al., 2009) y del mundo (Pyne, Andrews & Laven, 1996). Esto se debe a que impactan de manera directa la estructura y composición de los bosques, representando así una amenaza real para su conservación; además, los incendios forestales contribuyen al calentamiento global con la emisión de dióxido de carbono a la atmósfera (Chuvieco, Giglio & Justice, 2008; Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2007). En todo el mundo, más del 90% de los incendios están vinculados directa o indirectamente a acciones humanas intencionales y no intencionales (FAO, 2007). Varios estudios confirman esta tendencia (Ager, Preisler, Arca, Spano & Bellis, 2014; Argañaraz, Pizarro, Zak, Landi & Bellis, 2015; Gralewicz, Nelson & Wulder, 2012; Vilar, Camia, San-Miguel-Ayanz & Martín, 2016). Los incendios forestales, de acuerdo con su causa, pueden ser denominados incendios causados por humanos o incendios de origen natural, estos últimos son causados por sequías, rayos, erupciones volcánicas y terremotos (Costafreda-Aumedes, Comas & Vega-García, 2018). Específicamente, en México se estima que el 99% de los incendios forestales son causados por actividades humanas (Conafor, 2008). Cabe mencionar que el país actualmente cuenta con el Sistema Nacional de Información y Gestión Forestal (SNIGF), el cual reporta semanalmente los incendios que ocurren en el territorio nacional a cargo de la Conafor.

La creciente preocupación mundial ante los incendios provocados por actividades humanas ha desencadenado el desarrollo de modelos de ocurrencia de incendios en muchos países (Ganteaume et al., 2013). Dichos modelos han sido basados en diversos métodos estadísticos, tales como modelos Poisson (Jiang, Zhuan & Mandallaz, 2012; Marchal, Cumming & McIntire, 2017), modelos de regresión (Guo et al., 2015; Liu & Zhang, 2015; Pan, Wang & Li, 2016), algoritmos de árboles de decisión (Oliveira, Oehler, San-Miguel-Ayanz, Camia & Pereira, 2012), de aprendizaje autónomo (Rodrigues & de la Riva, 2014) o redes neuronales (Sakr, Elhajj, & Mitri, 2011), entre otros. Al ejecutarse los modelos, generalmente integran diversas variables tanto antrópicas como ambientales (González-Olabarria, Mola-Yudego & Coll, 2015; Mann et al., 2016; Mundo, Wiegand, Kanagaraj & Kitzberger, 2013; Plucinski, McCaw, Gould & Wotton, 2014). De acuerdo con Costafreda-Aumedes et al. (2018), la modelación de la probabilidad de la ocurrencia de incendios con una perspectiva antrópica de su ocurrencia ha alcanzado un alto nivel de desarrollo en Europa, América del Norte y China; sin embargo, África y Latinoamérica, ya caracterizadas como zonas importantes de incendios activas (Chuvieco et al., 2008), todavía requieren de un esfuerzo para el desarrollo de su modelación. En México existen pocos estudios bajo este enfoque, los cuales tienen una escala local o regional. Entre ellos se encuentran el realizado por Vilchis-Francés, Díaz-Delgado, Magaña-Lona & Gómez-

Albores (2015) para la cuenca del río Balsas; el de Farfán et al. (2018) para la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca; y el de Ibarra-Montoya & Huerta-Martínez (2016) para el Bosque la Primavera, en Jalisco. Dichos estudios integraron variables antrópicas en sus modelos predictivos a incendios forestales, tales como la distancia a caminos y a los usos del suelo, por ejemplo, asentamientos humanos, áreas agropecuarias, entre otros. A nivel nacional, recientemente Monjarás-Vega et al. (2020) realizaron una modelación bajo el enfoque de la regresión geográfica ponderada (RGP), en la que consideraron variables antrópicas como las mencionadas para la predicción de la ocurrencia de incendios. En sus resultados encontraron que existe un efecto fuertemente relacionado con la infraestructura vial para explicar el patrón espacial de su ocurrencia. Sin embargo, dadas las condiciones heterogéneas en tipos de vegetación, topografía y usos del suelo presentes en la República Mexicana, resulta necesario desarrollar modelos adecuados a una escala regional o inclusive con un mayor nivel de detalle, para garantizar que dichos modelos puedan brindar fiabilidad a sus resultados y que incorporen las particularidades de cada región.

Por tanto, el desarrollo de la modelación espacial de la probabilidad a incendios forestales bajo un enfoque antrópico es crucial, ya que sus productos cartográficos permiten incidir en la planeación territorial de las acciones dirigidas a la prevención de los incendios forestales en diferentes escalas de gobierno. Productos de esta índole identifican lugares en que se deben realizar acciones para reducir la disponibilidad del material combustible y permiten parametrizar modelos de simulación de incendios forestales, para probar de qué manera cambios en el uso del suelo o el clima, por ejemplo, podrían afectar tanto la intensidad como los patrones espaciales de los incendios (Ager et al., 2014).

El presente trabajo tuvo como principal objetivo desarrollar un modelo espacial explícito de la probabilidad de ocurrencia a los incendios forestales para el estado de Guanajuato. La originalidad de este estudio reside en dos aspectos. El primero es el uso del método de los pesos de evidencia, basado en estadística bayesiana, para el cálculo de la probabilidad; el segundo es que no existe para la región un estudio previo con un enfoque antrópico que considere así las fuentes de ignición de la vegetación forestal. Finalmente, se busca contribuir en la planificación de los recursos de extinción de incendios forestales y las obras de asignación para la implementación de estrategias para su prevención en el estado de Guanajuato.

Contexto del área de estudio

El estado de Guanajuato se ubica en la parte central de México. Sus coordenadas extremas son 21° 51' y 19° 55' N, y 99° 40' y 102° 06' O. Tiene una extensión de 30 617.6 km², lo que representa el 1.6% del territorio nacional (figura 1). El rango altitudinal abarca desde los 640 msnm en el municipio de Xichú, hasta los 3320 msnm en el cerro El Zamorano, en el municipio de Tierra Blanca. Así, la región noreste del estado presenta las mayores variaciones de relieve, con los sitios de menor y mayor elevación.

De acuerdo con el Inventario Estatal Forestal del Estado (2014), 37% de la superficie estatal corresponde a vegetación forestal. La vegetación está compuesta por bosques templados y tropicales, matorral xerófilo y pastizal natural. Los bosques templados son formaciones de encinares y coníferas, así como bosques mixtos de encino y coníferas, con especies características como *Quercus laurina*, *Q. rugosa*, *Pinus montezumae*, *P. cembroides* y *P. pseudostrobus*. Los bosques tropicales están conformados por especies como *Bursera simaruba*, *Ceiba aesculifolia*, *Ipomoea murucoides*, *Acacia farnesiana* y *A. schaffneri*. Además, existen amplias zonas de matorral xerófilo, donde destacan las especies *Myrtillocactus geometrizans*, *Yucca filifera*, *Larrea tridentata* y *Juniperus monosperma* (Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad [Conabio], 2012). En este estudio, los tipos de vegetación antes mencionados fueron agrupados en una sola categoría denominada forestal.

El estado de Guanajuato cuenta con 23 áreas naturales protegidas (ANP) y una Reserva de la Biosfera, la Sierra Gorda de Guanajuato, que en conjunto protegen aproximadamente el 12.5% de la cobertura forestal. A pesar de dichas áreas protegidas, de acuerdo con Zamudio (2012), en la actualidad todos los tipos de vegetación de Guanajuato se encuentran fuertemente deteriorados. La mayoría de las comunidades vegetales han sufrido cambios profundos en su estructura, composición florística y fisonomía, de tal manera que sus áreas de distribución se han reducido paulatinamente. En contraparte, el 63% del territorio son zonas transformadas en áreas agropecuarias, asentamientos humanos y áreas desprovistas de vegetación. Particularmente, la región sur del estado, conocida como Bajío guanajuatense, se ha caracterizado por tener un desarrollo agrícola importante desde la época de la Colonia, e incluso llegó a ser considerada como "el granero de México" (Conabio, 2012). Dada esta gran superficie del estado ya transformada, se debe enfatizar que el proceso de deterioro de los ecosistemas forestales en el estado continúa, puesto que los factores causantes de su destrucción siguen presentes, en donde la ocurrencia de incendios forestales es un factor que se suma a dicho proceso y que no ha sido abordado desde un enfoque espacial para su prevención y combate.

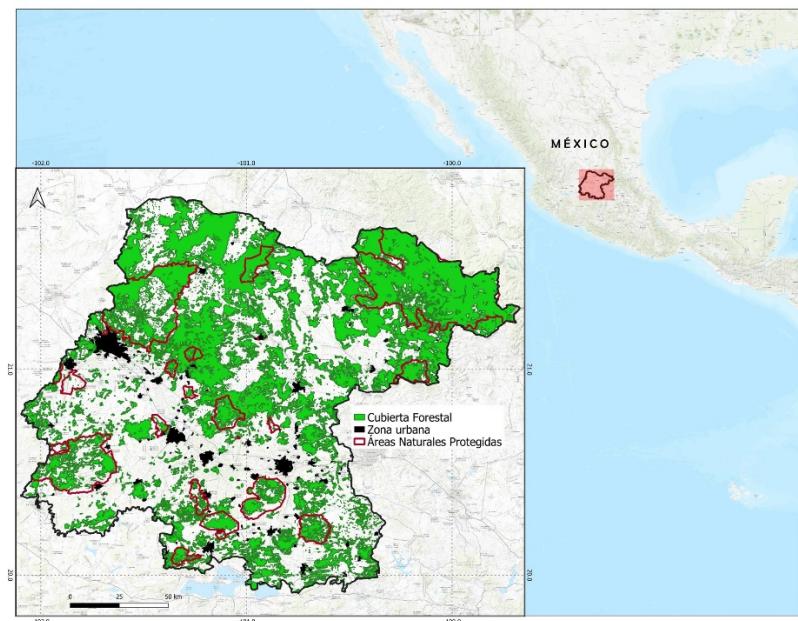


Figura 1. Localización del área de estudio.
 Fuente: Elaboración propia a partir de la cartografía de INEGI.

Materiales y métodos

Variables antrópicas empleadas como insumos del modelo

Se integraron datos cartográficos relacionados con las actividades antrópicas en el estado de Guanajuato (tabla 1). Se utilizaron los mapas de vegetación y uso del suelo del 2004, 2009 y 2014 a escala 1:50000, elaborados por el Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato, ahora Secretaría de Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial (SMAOT). Estos mapas cuentan con 19 categorías de vegetación y uso del suelo. Los usos del suelo seleccionados fueron agricultura de temporal y de riego, pastizales inducidos y asentamientos humanos a partir de los cuales se calcularon las distancias euclidianas a cada uno de ellos.

Considerando las observaciones hechas por Cochrane & Schulze (1999) y Nepstad *et al.* (1999), en las que se revela que la fragmentación de la vegetación hace a esta más susceptible a los incendios, se definieron los bordes de los fragmentos forestales utilizando una clasificación donde se asigna el valor de 1 a la cobertura forestal y el valor de 0 a la no forestal, a partir del mapa de vegetación y uso del suelo. Se calculó la vecindad binaria media de la cubierta forestal (bosque = 1) utilizando la herramienta focal statistics de ARCGIS (versión 10.3) con una ventana de 20x20 pixeles. El mapa resultante contuvo valores de 0 a 1, donde 0 representa pixeles en áreas no forestales alejadas del borde del bosque, y 1 representa los pixeles que están dentro de los bosques y alejados de sus bordes. Como se pretende evaluar el impacto del borde, se estableció un valor de 0.5 como valor máximo para los bordes, donde resulta igual la influencia de los bosques y las cubiertas de no bosques, es decir, zonas con uso del suelo antrópico. Por otra parte, para interpolar los valores de densidad de población, se empleó el método de la distancia inversa ponderada (IDW) con un radio variable, una distancia máxima de 4 km y una potencia de 2. En la tabla 1 se enlistan todas las variables consideradas en la calibración del modelo, así como la fuente de donde se obtuvo la información.

Tabla 1. Variables empíricas seleccionadas para explicar la ocurrencia de incendios forestales en el estado de Guanajuato con una resolución espacial de 90 m.

Insumo cartográfico	Descripción	Fuente
Incendios ocurridos del 2008, 2014 y 2017.	Cartografía de áreas quemadas para el estado de Guanajuato, escala 1:50000.	García (2019)
Modelo digital de elevación (MDE).	Recorte del modelo original del <i>Shuttle Radar Topography Mission</i> (STRM), de <i>United States Geological Survey</i> (USGS).	Producto derivado del modelo original STRM-USGS (2007)
Distancia a vías de comunicación.	Distancia euclíadiana a las principales vías de comunicación.	Elaboración propia con base en el mapa de carreteras (INEGI, 2000).
Distancia a deforestación.	Distancia euclíadiana a deforestación.	Elaboración propia a partir de los mapas de la SMAOT 2004 Y 2009 de vegetación y usos del suelo.
Distancia a agricultura de riego.	Distancia euclíadiana a la agricultura de riego.	Elaboración propia con base en Mapa de uso de suelo y vegetación (SMAOT, 2004).
Distancia a agricultura de temporal.	Distancia euclíadiana a la agricultura de temporal.	Elaboración propia con base en el Mapa de uso de suelo y vegetación (SMAOT, 2004).
Distancia a asentamientos humanos.	Distancia euclíadiana a asentamientos humanos.	Elaboración propia con base en el Mapa de uso de suelo y vegetación (INEGI, 2001).
Distancia a pastizal inducido.	Distancia euclíadiana a pastizal inducido.	Elaboración propia con base en el Mapa de uso de suelo y vegetación (INEGI, 2001).
Borde del bosque.	Estimación del borde de bosque.	Elaboración propia con base en el Mapa de uso de suelo y vegetación (SMAOT, 2004).
Densidad de población.	Interpolación mediante IDW.	Elaboración propia con base en el censo población y vivienda (INEGI, 2010).
Vegetación forestal (2004, 2009 y 2014).	Mapa de uso de suelo y vegetación continuo a escala 1:50000.	Elaboración propia, producto derivado del Mapa de uso de suelo y vegetación (SMAOT).

Fuente: Elaboración propia.

Calibración de la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales

Se utilizó el software Dinamica EGO (Soares-Filho et al., 2006), en su versión 4.0.10 de acceso gratuito, para desarrollar el modelo espacialmente explícito de probabilidad a la ocurrencia de incendios forestales empleando las variables de la tabla 1, las cuales fueron integradas para su calibración. Además de las variables, se emplearon los mapas de cubierta forestal de los años 2004 y 2009, en donde el tiempo inicial y final del periodo de calibración fue 2004 (tiempo 1) y 2009 (tiempo 2). Se empleó también la cartografía de las áreas quemadas generada por García (2019) para el año 2008, con la que se definió la transición de cubierta forestal a incendios. Dicha cartografía derivó del procesamiento de imágenes satelitales Landsat TM y reportó una superficie de 1894 ha, superficie que coincide aproximadamente con el reporte de Conafor (2008) para el mismo año con 1841 ha. Este año se eligió por ser un año próximo a la cartografía de vegetación y uso del suelo del año 2009 disponible a escala 1:50000, elaborada por la SMAOT del estado de Guanajuato. Finalmente, se empleó la cartografía de áreas quemadas del año 2017 como datos independientes para la evaluación del modelo. De acuerdo con García (2019), en este año se quemaron 8460 ha, superficie superior a la reportada por Conafor para la misma fecha (7665 ha). Los datos de Conafor sobre incendios forestales no se utilizaron porque carecen de la exactitud geográfica requerida. A pesar de que muchos estudios toman sus registros de incendios forestales, pocas veces se cuestiona su fiabilidad y precisión. En este sentido, González-Gutiérrez, Mas-Caussel, Morales-Manilla & Oceguera-Salazar (2020) reportaron una carencia de exactitud en cuanto al número y a la cantidad total de incendios detectados con imágenes de alta resolución versus los reportes de incendios de Conafor para el estado de Michoacán.

Posteriormente, se calculó la correlación entre las variables. Para ello se empleó el coeficiente de Cramer, basado en una prueba tipo chi cuadrado (χ^2), el cual varía entre 0 y 1, donde 0 indica variables totalmente independientes y 1 indica variables totalmente correlacionadas (para más detalles del desarrollo de la prueba, consultar De Almeida et al., 2003). Si el índice es mayor a 0.45, hay suficiente correlación entre ambas variables y es necesario descartar alguna de ellas. Finalmente, se llevó a cabo el cálculo de los pesos de evidencia, que identifica las áreas más propensas para que ocurran los incendios. Para ello, se comparó cartográficamente (para la transición bosque a incendio) la localización de las áreas más propensas respecto a diferentes variables explicativas cartografiadas y que se enlistan en la tabla 1. El método de los pesos de evidencia se basa en las probabilidades condicionales y es un algoritmo bayesiano (Bonham-Carter, 1994; Soares Filho et al., 2004). Se llama probabilidad condicional a la probabilidad de que un suceso se cumpla habiéndose cumplido otro previamente. El peso positivo de evidencia, $w+$, asociado a la presencia de la condición considerada, se calcula según la ecuación (1):

$$w+ = \ln \left[\frac{P(C|D)}{P(C|\bar{D})} \right] \quad (1)$$

donde $P(C|D)$ es la probabilidad de ocurrir un evento C , dado la condición de la presencia del evento D ; y $P(C|\bar{D})$ es la probabilidad de ocurrir un evento C , dado la condición de la ausencia del evento D . Por ejemplo, $P(C|D)$ es la probabilidad de estar cerca de una carretera sabiendo que hubo un incendio (en términos prácticos, es la proporción de los pixeles con un incendio que se encuentran cerca de carreteras) y $P(C|\bar{D})$ es la probabilidad de estar cerca de una carretera sabiendo que no hubo un incendio (proporción de los pixeles sin incendio que se encuentran cerca de carreteras). Cuando la presencia de la condición tiende a aumentar la probabilidad del evento, el valor del peso $w+$ es positivo. Cuando la presencia de la condición tiende a disminuir la probabilidad del evento, este valor es negativo. El cálculo de la probabilidad condicional al tomar en cuenta varias condiciones es sencillo, ya que se suman los pesos de evidencia. Para esto, el supuesto de independencia condicional entre las variables es requerido, por lo que se calculó el coeficiente de Cramer entre las variables explicativas.

Evaluación de las probabilidades de ocurrencia

La evaluación del modelo consistió en calcular la coincidencia espacial a través de comparar las áreas quemadas de los incendios del año 2017 (datos independientes a la calibración) con las probabilidades calculadas por el modelo. Cabe destacar que la cartografía de las áreas quemadas utilizada derivó del trabajo de García (2019), generada mediante el procesamiento de imágenes del satélite Landsat 8. La comparación se llevó a cabo a través del análisis estadístico curva característica operativa del receptor (ROC) (Mas, Soares, Gilmore, Farfán & Rodrigues, 2013). El resultado de un análisis ROC tiene un rango de valores de 0.5 a 1. El valor 0.5 representa el resultado de ROC de un modelo nulo, y el valor mayor que 0.5 indica que el modelo tiene un mejor desempeño que un modelo nulo. Por tanto, mientras más alto sea el valor, el desempeño del modelo es mejor. Generalmente, los resultados en una curva ROC se pueden interpretar de la siguiente manera: Si un modelo tuvo resultados de 0.5 a 0.6, estos representan un modelo fallido; de 0.6 a 0.7 indican que el modelo tiene una baja capacidad de predicción; de 0.7 a 0.8 indican que el modelo posee una buena capacidad de predicción; si los resultados van de 0.8 a 0.9, el modelo tiene muy buena capacidad de predicción; y si son de 0.9 a 1, el modelo tiene una excelente capacidad predictiva (del Valle, 2017).

Mapa de probabilidad a incendios forestales

Las probabilidades estimadas fueron reclasificadas en cuatro clases: baja, media, alta y muy alta, empleando el método de rupturas naturales (o *natural breaks*) usando el programa ARCGIS (versión 10.3).

Resultados

En la figura 2 se observa el mapa de probabilidad de ocurrencia a incendios forestales, en el que los tonos rojos representan las probabilidades más altas, iguales a 1, y los tonos azules representan los valores más bajos, cercanos a 0. Dichas probabilidades cercanas a 0 se ubican en las partes altas del territorio, en elevaciones cercanas a los 2500 msnm y alejadas de los asentamientos humanos.

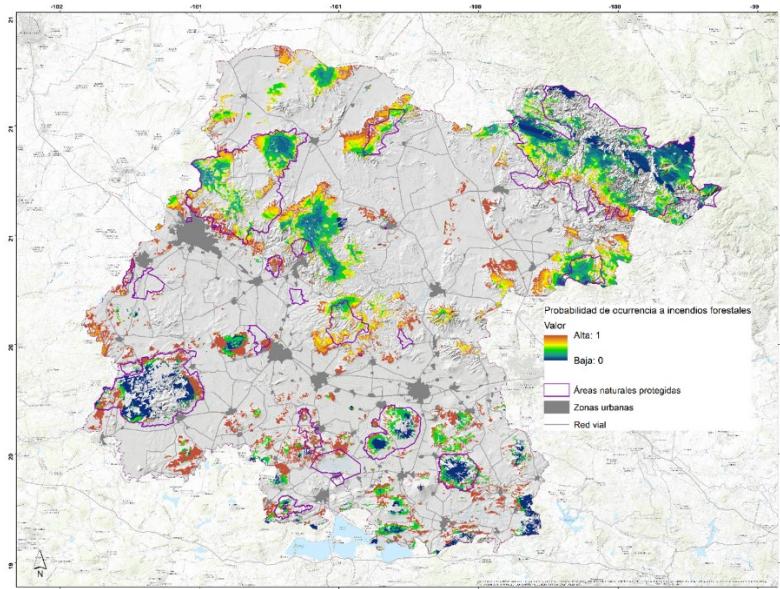


Figura 2. Mapa de probabilidad de ocurrencia de incendios forestales para el estado de Guanajuato. Se muestra en color rojo las áreas con valores de alta probabilidad, y en color azul los de baja probabilidad. También se muestran los polígonos de las ANP de color morado.

Fuente: Elaboración propia.

Como se indicó antes, las probabilidades estimadas fueron reclasificadas en cuatro categorías de ocurrencia: baja, media, alta y muy alta (figura 3). Es posible observar que en la zona sur del estado la cubierta forestal está compuesta por fragmentos pequeños inmersos en una matriz agrícola, lo que hace que la categoría de probabilidad alta a incendios forestales predomine en esta zona del estado.

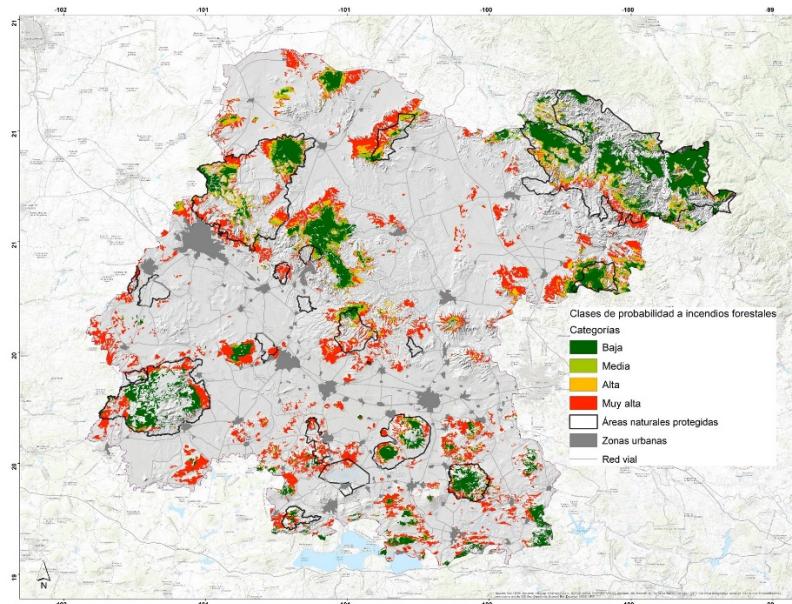


Figura 3. Mapa de categorías de probabilidad a la ocurrencia de incendios forestales para el estado de Guanajuato, con cuatro categorías: baja, media, alta y muy alta.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la figura 4, la distancia a la agricultura de riego, de temporal, a los pastizales y a los caminos son variables importantes para explicar la ocurrencia de incendios en las cubiertas forestales del estado de Guanajuato. En particular, el peso de evidencia positivo (w_+) calculado para la distancia al pastizal indicó un efecto de proximidad importante en una distancia no mayor a los 300 m, en contraste con la variable de distancia a agricultura de riego que tiene el rango más amplio de distancias. Los pesos de evidencia positivos calculados en este caso indican un rango de valores tres veces mayor de distancia hasta un valor de 900 m.

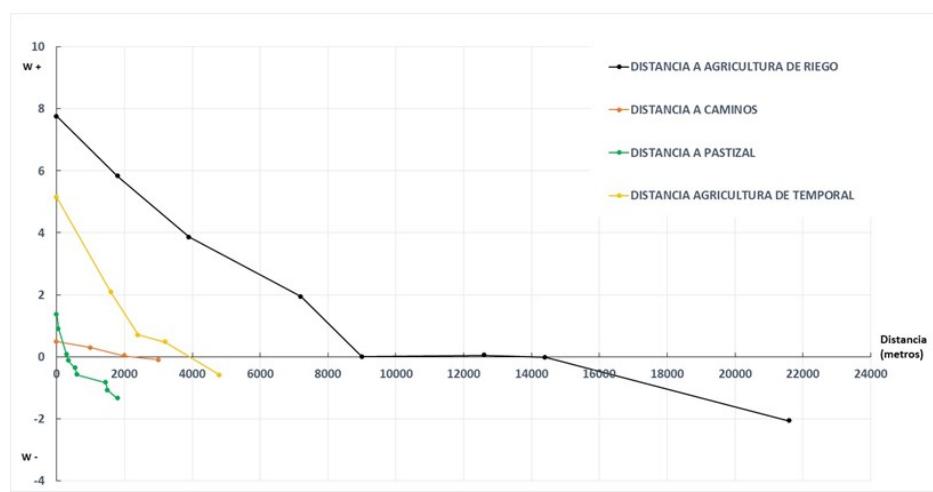


Figura 4. Pesos de evidencia calculados para las variables distancia a agricultura de riego, distancia a agricultura de temporal, distancia a pastizal y distancia a caminos. En el eje de las ordenadas se representa el peso de evidencia, que va de un valor positivo (w^+) a un peso negativo (w^-). En el eje de las abscisas tenemos la distancia euclíadiana en metros a los usos de suelo ya referidos.

Fuente: Elaboración propia.

La evaluación del mapa de probabilidades de ocurrencia a incendios forestales antrópicos con la prueba estadística de la curva ROC arrojó un valor de área bajo curva (AUC) de 0.74, indicando un 74% de concordancia entre las probabilidades más altas del modelo y los incendios ocurridos en el año 2017 (figura 5).

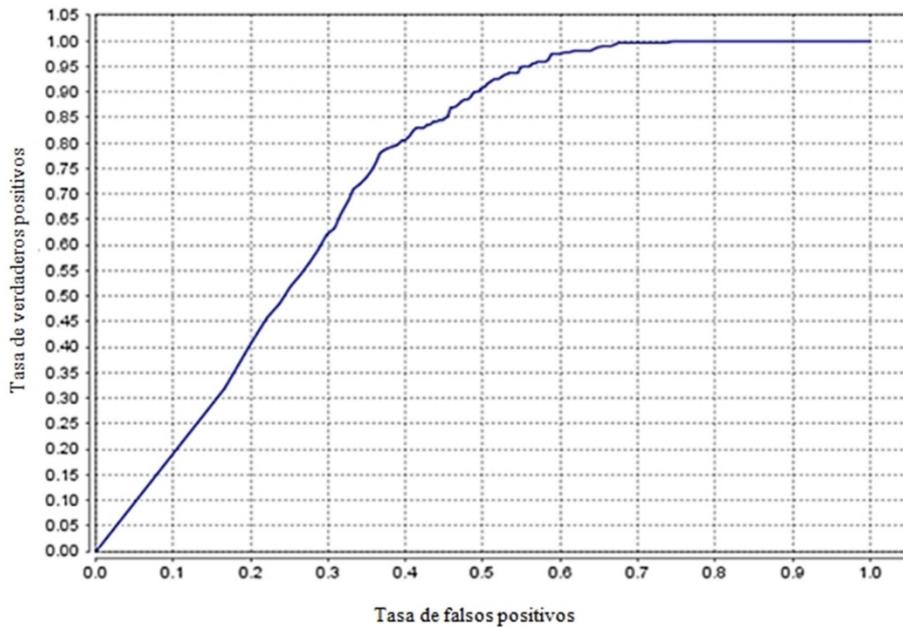


Figura 5. Curva ROC obtenida al comparar el mapa de probabilidad modelado con los incendios ocurridos en el año 2017.

Fuente: Elaboración propia.

La curva representa en el eje de las abscisas la tasa de falsos negativos, mientras que en el eje de las ordenadas se presenta la tasa de verdaderos positivos. Las celdas clasificadas como verdaderos positivos son aquellas donde el modelo y la condición del bosque observado quemado coinciden. Hosmer & Lemeshow (2000) establecieron que si el intervalo de valores del área bajo la curva es $0.7 \leq \text{ROC} < 0.8$, la

discriminación del modelo es aceptable; y si es $0.8 \leq ROC < 0.9$, denota una excelente discriminación. Por lo tanto, el producto obtenido posee una aceptable capacidad de predicción de ocurrencia de los incendios forestales.

Discusión

De acuerdo con los resultados de los pesos de evidencia, la variable distancia a agricultura de temporal resultó ser relevante en el modelo. La distancia a zonas de cultivo ha sido empleada como variable explicativa en varias propuestas de modelación que han demostrado su asociación con la generación de incendios forestales (Avila-Flores *et al.*, 2010; Ganteaume *et al.*, 2013; García, Trejo, Tchikoué, Rivas & Pérez, 2012; Farfán *et al.*, 2018; Rodrigues & de la Riva, 2014). En este sentido, Martínez-Torres, Castillo, Ramírez & Pérez-Salicrup (2016) plantean que el fuego es utilizado para eliminar malezas, hacer rebrotar pasto para el ganado, limpiar la parcela de esquilmos agrícolas y/o matar plagas (huevos, larvas), entre otras. Visto así, el fuego es una *herramienta* más del campesino. En contraparte a esta arraigada práctica en nuestro país, existe la normatividad con las especificaciones técnicas de los métodos de uso del fuego en los terrenos forestales y en los terrenos de uso agropecuario definidos por la norma oficial mexicana NOM-015-Semarnat/Sagarpa-2007 (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2009), la cual busca reducir la ocurrencia de incendios forestales asociados con el uso del fuego en las prácticas agrícolas y pecuarias. En particular, en el estado de Guanajuato, la norma técnica ambiental NTA-IEG-005/2000 (Periódico Oficial del Gobierno del Estado de Guanajuato, 2000) que regula el manejo de los esquilmos agrícolas prohíbe su quema. Sin embargo, de acuerdo con Martínez-Torres *et al.* (2016), dicha NOM-015-Semarnat/Sagarpa-2007 no ha logrado ser ampliamente conocida y aceptada por los agricultores del país, y lo mismo puede ocurrir con la norma técnica del estado de Guanajuato.

A la luz de los instrumentos legales, como la NOM-015-Semarnat/Sagarpa-2007 y la NTA-IEG-005/2000 antes mencionadas, las características espaciales de una capa geográfica digital, capaz de mostrar visualmente la susceptibilidad de la cubierta forestal a los incendios forestales para diferentes demarcaciones o zonas de atención, hacen que su uso sea un complemento indispensable en la implementación del Sistema de Comando de Incidentes. Dicha cartografía puede tener un uso más local, como el que harían los propietarios y poseedores de los terrenos forestales, los prestadores de servicios forestales o los encargados de la administración de las ANP, que en el caso del estado de Guanajuato están a cargo de la SMAOT. Esta instancia está obligada a ejecutar trabajos de manejo de combustibles y a realizar acciones de prevención de los incendios forestales. En particular, resulta de suma importancia implementar dichas acciones para las ANP al sur del estado, como la Sierra de Pénjamo y Sierra de los Agustinos, así como al noroeste, en la Sierra de Lobos que colinda con la zona urbana de León. En el año 2019, de acuerdo con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat), hubo 19 174 ha siniestradas por incendios forestales; sin embargo, esta superficie está subestimada. De acuerdo con Salazar, Farfán & Arellano (2019), fueron consumidas 52 713 ha forestales, de las cuales 7366 ha corresponden a superficies forestales dentro de las áreas protegidas estatales de Guanajuato. Dichas estimaciones muestran que es prioritario desarrollar planes de manejo del fuego para el sistema de ANP del estado de Guanajuato. De acuerdo con Conafor (2014), si bien no existe una receta para su diseño, deben comprender por lo menos tres tipos de intervención: el técnico, el institucional y el comunicativo, para lograr una adecuada planificación del fuego con una visión a largo plazo.

El enfoque de modelación aquí desarrollado, basado en los pesos de evidencia, tiene como antecedente un modelo probabilístico de la ocurrencia de incendios para la Amazonía brasileña (Almeida *et al.*, 2011). Los resultados de este estudio coinciden con los de Almeida *et al.* (2011), en relación con la influencia de los caminos como una importante variable en la determinación de las áreas forestales con

una alta probabilidad a incendios. En la figura 2 se pueden observar valores cercanos a 1 para los fragmentos forestales localizados a lo largo del corredor industrial del estado, definido por las ciudades de León, Silao, Irapuato, Salamanca y Celaya.

En el contexto internacional, en particular en Europa, de acuerdo con una revisión realizada por Ganteaume *et al.* (2013), se determinó que casi todos los incendios son causados por el hombre, en donde la distancia a los caminos y la distancia a las zonas urbanas son los factores humanos más frecuentemente utilizados en la elaboración de modelos de ocurrencia de incendios forestales, destacando la interfase urbano-forestal como un área propicia para su ocurrencia. Si bien existen otros enfoques de modelación que combinan variables climáticas y variables de combustible forestal, como el caso de Manzo-Delgado, Aguirre-Gómez y Álvarez (2004), Villers-Ruiz & López (2004) y Vilchis-Francés *et al.* (2015), no se da un peso relevante a las variables antrópicas. Sin embargo, las actividades humanas son la causa principal de los incendios forestales en México (Ressl & Cruz, 2012). En particular, este conocimiento traducido en una probabilidad de ocurrencia para el estado de Guanajuato es un paso indispensable para poder transitar hacia políticas efectivas para la prevención de incendios forestales.

Conclusiones

Se obtuvo la cartografía de probabilidad a incendios forestales para el estado de Guanajuato con una aceptable capacidad predictiva de su ocurrencia. Esta cartografía derivó del modelo espacial explícito desarrollado con el método de los pesos de evidencia que integró las fuentes de ignición antrópica. Los incendios en el estado de Guanajuato no se distribuyen aleatoriamente por todo el paisaje, sino que están mediados por la condición del bosque; es decir, si es un fragmento forestal rodeado por una matriz de uso de suelo agrícola y su proximidad a los caminos, entonces tendrán una clase de probabilidad muy alta para que ocurran. La cartografía de probabilidad aquí presentada es una herramienta que permite la planeación de acciones en torno a la prevención de incendios en combinación con el marco legal que proporciona la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (Semarnat, 2008), la NOM-015 y la NTA-IEG-005/2000, siempre y cuando sea tomada en cuenta por las instituciones competentes en los tres niveles de gobierno. La integración operativa de dichos instrumentos en conjunto con la cartografía de probabilidad a la ocurrencia de incendios forestales permitirá alcanzar el objetivo 15 de la Agenda 2030 de la ONU, en relación con la gestión sostenible de los bosques. En un mediano plazo, se considera integrar información sobre los tipos de ecosistemas forestales y su carga de combustible dentro de este enfoque de modelación espacialmente explícita, para así poder determinar el peligro de los incendios que podría existir en las diversas zonas forestales del estado de Guanajuato.

Por último, se sugiere que este tipo de estudios se generalicen para todo el país, lo cual mejoraría las estrategias de combate, prevención y manejo de los incendios forestales.

Agradecimientos

Agradecemos el apoyo de la Secretaría de Educación Pública por el financiamiento otorgado a través de la convocatoria Fortalecimiento de Cuerpos Académicos 2017 (UGTO-CA-180) y al Dr. Britaldo Silveira Soares-Filho de la Universidad Federal de Minas Gerais, Brasil, por su colaboración académica para realizar el presente estudio.

Referencias

- Ager, A. A., Preisler, H. K., Arca, B., Spano, D., & Salis, M. (2014). Wildfire risk estimation in the Mediterranean area. *Environmetrics*, 25(6), 384–396. doi: <https://doi.org/10.1002/ENV.2269>
- Almeida, R., Soares-Filho, B. S., Nepstad, D., Coe, M., Rodrigues, H., & Assunção, R. (2011). Simulating fire regimes in the Amazon in response to climate change and deforestation. *Ecological Applications*, 21(5), 1573-1590. doi: <https://doi.org/10.1890/10-0827.1>
- Argañaraz, J. P., Pizarro, G., Zak, M., Landi, M. A., & Bellis, L. M., (2015). Human and biophysical drivers of fires in semiarid Chaco Mountains of Central Argentina. *Science of the Total Environment*, 520, 1–12. doi: <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2015.02.081>
- Avila-Flores, D., Pompa-García, M., Antonio-Nemiga, X., Rodriguez-Trejo, D. A., Vargas-Perez, E., & Santillan-Perez, J. (2010). Driving factors for forest fire occurrence in Durango State of Mexico: A geospatial perspective. *Chinese Geographical Science*, 20(6), 491-497 doi: <https://doi.org/10.1007/s11769-010-0437-x>
- Bonham-Carter, G. (1994). *Geographic information systems for geoscientists: Modelling with GIS*. Oxford, UK: Pergamon Press. <https://www.sciencedirect.com/book/9780080418674/geographic-information-systems-for-geoscientists>
- Burgueño, M. J., García-Bastos, J. L., & González-Buitrago, J. M. (1995). Las curvas ROC en la evaluación de las pruebas diagnósticas. *Med Clin (Barc)*, 104(17), 661-670.
- <https://www.semanticscholar.org/paper/Las-curvas-ROC-en-la-evaluaci%C3%B3n-de-las-pruebas-Burgue%C3%BDo-Garc%C3%ADa-Bastos/f267335f672ed57435a6f46bd8727e603d825a65?p2df>
- Chuvieco, E., Giglio, L., & Justice, C. (2008). Global characterization of fire activity: Toward defining fire regimes from Earth observation data. *Global Change Biology*, 14(7), 1488-1502. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01585.X>
- Cochrane, M. A., & Schulze, M. D. (1999). Fire as a recurrent event in tropical forests of the eastern Amazon: Effects on forest structure, biomass, and species composition. *Biotropica*, 31(1), 2-16. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.1999.tb00112.x>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2016). *Horizontes 2030: La igualdad en el centro del desarrollo sostenible*. México: CEPAL, ONU. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/40159-horizontes-2030-la-igualdad-centro-desarrollo-sostenible>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio). (2012). *La biodiversidad en Guanajuato: Estudio de Estado*. México: Conabio/Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato (IEE). <https://smaot.guanajuato.gob.mx/sitio/biodiversidad/146/La-Biodiversidad-de-Guanajuato-Estudio-de-Estado>
- Comisión Nacional Forestal (Conafor). (2008). *Informe final de incendios forestales 2008*. <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi1rOHngATsAhVRZc0KHb3SD0gQFjACegQIBhAC&url=https%3A%2F%2Fsnigf.cnf.gob.mx%2Fwp-content%2Fuploads%2FIncendios%2FInformes%2520anuales%2FInforme-final-de-Incendios-Forestales-2008.pdf&usg=A0vVaw1EjmVj5eD1VpOTBtUY0OuL>
- Comisión Nacional Forestal (Conafor). (2014). *Principios y criterios para el manejo del fuego en ecosistemas forestales: Guía de campo*. <http://www.conafor.gob.mx:8080/biblioteca/ver.aspx?articulo=727>
- Costafreda-Aumedes, S., Comas, C., & Vega-García, C. (2018). Human-caused fire occurrence modelling in perspective: A review. *International Journal of Wildland Fire*, 26(12), 983-998. doi: <https://doi.org/10.1071/WF17026>
- De Almeida, C. M., Batty, M., Vieira, A. M., Camara, G., Silveira, B. S., Coutinho, C., & Lopes, C. (2003). Stochastic cellular automata modeling of urban land use dynamics: Empirical development and estimation. *Computers, Environment and Urban Systems*, 27(5), 481-509. doi: [https://doi.org/10.1016/S0198-9715\(02\)00042-X](https://doi.org/10.1016/S0198-9715(02)00042-X)
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (16 de enero de 2009). Norma Oficial Mexicana NOM-015-Semarnat/Sagarpa-2007, *Que establece las especificaciones técnicas de métodos de uso del fuego en los terrenos forestales y en los terrenos de uso agropecuario*. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). <https://www.gob.mx/profepa/documentos/norma-oficial-mexicana-nom-015-semarnat-sagarpa-2007>

- Farfán, M., Pérez-Salicrup, D. R., Flamenco-Sandoval, A., Nicasio-Arzeta, S., Mas, J. F., & Ramírez, I. (2018). Modelación de los factores antrópicos como conductores de la ocurrencia de incendios forestales en la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca. *Madera y Bosques*, 24(3), e2431591. doi: <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2431591>
- Ganteaume, A., Camia, A., Jappiot, M., San-Miguel-Ayanz, J., Long-Fournel, M., & Lampin, C. (2013). A review of the main driving factors of forest fire ignition over Europe. *Environmental Management*, 51(3), 651-662. doi: <https://doi.org/10.1007/s00267-012-9961-z>
- Gallegos, A., González, G. A., Cabrera, R. G., Marcelli, C., & Hernández, E. (2014). Efecto de la recurrencia de incendios forestales en la diversidad arbórea. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(24), 110-125. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322014000400010
- García, J. G. (2019). *Cartografía y validación de la superficie quemada por incendios forestales (2008, 2014, 2017) en el Estado de Guanajuato* (Tesis de Licenciatura). Universidad de Guanajuato: Guanajuato. https://drive.google.com/file/d/1Wc-krvWv3FN_Zg6Gyns-EqOScbgy40ud/view?usp=drivesdk
- García, R. L. C., Trejo, D. A. R., Tchikoué, H., Rivas, A. I. M., & Pérez, J. S. (2012). Análisis espacial de peligro de incendios forestales en Puebla, México. *Interciencia*, 37(9), 678-683. <https://www.interciencia.net/wp-content/uploads/2018/01/678-RODRIGUEZ-6.pdf>
- González-Olabarria, J. R., Mola-Yudego, B., & Coll, L. (2015). Different factors for different causes: Analysis of the spatial aggregations of fire ignitions in Catalonia (Spain). *Risk Analysis*, 35(7), 1197-1209. doi: <https://doi.org/10.1111/risa.12339>
- González-Gutiérrez, I., Mas-Caussel, J. F., Morales-Manilla, L. M., & Oceguera-Salazar, K. A. (2020). Thematic accuracy of hotspots and wildfires in Michoacán, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 26(1), 17-35. doi: <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2019.01.011>
- Gralewicz, N. J., Nelson, T. A., & Wulder, M. A. (2012). Factors influencing national scale wildfire susceptibility in Canada. *Forest Ecology and Management*, 265, 20-29. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.10.031>
- Guo, F., Innes, J. L., Wang, G., Ma, X., Sun, L., Hu, H., & Su, Z. (2015). Historic distribution and driving factors of human-caused fires in the Chinese boreal forest between 1972 and 2005. *Journal of Plant Ecology*, 8(5), 480-490. doi: <https://doi.org/10.1093/jpe/rtu041>
- Hosmer, D. W., & Lemeshow, S. (2000). *Applied logistic regression* (2a ed.). New York: Wiley. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/0471722146>
- Ibarra-Montoya, J. L., & Huerta-Martínez, F. M. (2016). Spatial modeling of fires: A predictive tool for La Primavera Forest, Jalisco Mexico. *Revista Ambiente & Agua*, 11(1), 35-49. doi: <https://doi.org/10.4136/amb-agua.1536>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2000). *Espacio y datos de México*. <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2001). *Espacio y datos de México*. <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). *Mapas*. <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/default.html?t=071000000000000&ag=01>
- Inventario Estatal Forestal y de Suelos del estado de Guanajuato. (2014). *Resultados del inventario estatal de Guanajuato*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). <https://snigf.cnf.gob.mx/producto/resultados-del-inventario-estatal-de-guanajuato/>
- Jardel, E. J., Alvarado, E., Morfín-Ríos, J. E., Castillo-Navarro, F., & Flores-Garnica, J. G. (2009). Regímenes de incendios en ecosistemas forestales de México. *Impacto ambiental de incendios forestales. Mundi-Prensa, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias y Colegio de Postgraduados, Distrito Federal, Mexico*, 73-100.
- Jiang, Y., Zhuang, Q., & Mandallaz, D. (2012). Modeling large fire frequency and burned area in Canadian terrestrial ecosystems with poisson models. *Environmental Modeling and Assessment*, 17, 483-493. doi: <https://doi.org/10.1007/S10666-012-9307-5>
- Liu, D., & Zhang, Y. (2015). Research of regional forest fire prediction method based on multivariate linear regression. *International Journal of Smart Home*, 9(1), 13-22. doi: <https://doi.org/10.14257/IJSH.2015.9.1.02>

- Mann, M. L., Batllori, E., Moritz, M. A., Waller, E. K., Berck, P., Flint, A. L., Flint, L. E., & Dolfi, E. (2016). Incorporating anthropogenic influences into fire probability models: Effects of human activity and climate change on fire activity in California. *PLoS ONE*, 11(4), e0153589. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0153589>
- Marchal, J., Cumming, S. G., & McIntire, E. J. B. (2017). Exploiting Poisson additivity to predict fire frequency from maps of fire weather and land cover in boreal forests of Québec, Canada. *Ecography*, 40(1), 200–209. doi: <https://doi.org/10.1111/ecog.01849>
- Martínez-Torres, H. L., Castillo, A., Ramírez, M. I., & Pérez-Salicrup, D. R. (2016). The importance of the traditional fire knowledge system in a subtropical montane socio-ecosystem in a protected natural area. *International Journal of Wildland Fire*, 25(9), 911-921. doi: <https://doi.org/10.1071/WF15181>
- Mas, J. F., Soares, B., Gilmore, R. G., Farfán, M., & Rodrigues, H. (2013). A suite of tools for ROC analysis of spatial models. *International Journal of Geo-Information*, 2(3), 869-887. doi: <https://doi.org/10.3390/ijgi2030869>
- Manzo-Delgado, L., Aguirre-Gómez, R., & Alvarez, R. (2004). Multitemporal analysis of land surface temperature using NOAA-AVHRR: Preliminary relationships between climatic anomalies and forest fires. *International Journal of Remote Sensing*, 25(20), 4417-4424. doi: <https://doi.org/10.1080/01431160412331269643>
- Monjarás-Vega, N. A., Briones-Herrera, C. I., Vega-Nieva, D. J., Calleros-Flores, E., Corral-Rivas, J. J., López-Serrano, P. M., Ponpa-García, M., Rodríguez-Trejo, D. A., Carrillo-Parra, A., González-Cabán, A., Alvarado-Celestino, E., & Jolly, W. (2020). Predicting forest fire kernel density at multiple scales with geographically weighted regression in Mexico. *Science of The Total Environment*, 718, 137313. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137313>
- Mundo, I. A., Wiegand, T., Kanagaraj, R., & Kitzberger, T. (2013). Environmental drivers and spatial dependency in wild fire ignition patterns of northwestern Patagonia. *Journal of Environmental Management*, 123, 77–87. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.03.011>
- Nepstad, D. C., Verssimo, A., Alencar, A., Nobre, C., Lima, E., Lefebvre, P., Schlesinger, P., Potter, C., Moutinho, P., Mendoza, E., Cochrane, M., & Brooks, V. (1999). Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire. *Nature*, 398, 505–508. doi: <https://doi.org/10.1038/19066>
- Oliveira, S., Oehler, F., San-Miguel-Ayanz, J., Camia, A., & Pereira, J. M. C. (2012). Modeling spatial patterns of fire occurrence in Mediterranean Europe using multiple regression and random forest. *Forest Ecology and Management*, 275, 117–129. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.03.003>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (2007). *Situación de los bosques del mundo. Comité de Montes*. <http://www.fao.org/3/a0773s/a0773s00.htm>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (1987). *Informe de la Comisión Mundial para el Medio Ambiente y el Desarrollo. Nota del Secretario General*. http://www.ecominga.uqam.ca/PDF/BIBLIOGRAPHIE/GUIDE_LECTURE_1/CMMAD-Informe-Comision-Brundtland-sobre-Medio-Ambiente-Desarrollo.pdf
- Pan, J., Wang, W., & Li, J. (2016) Building probabilistic models of fire occurrence and fire risk zoning using logistic regression in Shanxi Province, China. *Natural Hazards*, 81, 1879–1899. doi: <https://doi.org/10.1007/S11069-016-2160-0>
- Periódico Oficial del Gobierno del Estado de Guanajuato. (18 de agosto de 2000). Norma Técnica Ambiental NTA-IEG-005/2000 que establece las especificaciones para mitigar los efectos adversos al ambiente y a la salud de los habitantes, por las inadecuadas prácticas y manejo de los residuos en las actividades agrícolas (esquilmos). https://transparencia.guanajuato.gob.mx/biblioteca_digital/docart10/200804291000210.Norma%20Tecnica%20Esquilmos.pdf
- Plucinski, M. P., McCaw, W. L., Gould, J. S., & Wotton, B. M. (2014). Predicting the number of daily human-caused bushfires to assist suppression planning in south-west Western Australia. *International Journal of Wildland Fire*, 23(4), 520–531. doi: <https://doi.org/10.1071/WF13090>
- Ressl, R., & Cruz, I. (2012). Detección y monitoreo de incendios forestales mediante imágenes de satélite (Conabio). *Biodiversitas*, 100, 12-13. <https://bioteca.biodiversidad.gob.mx/janium-bin/sumario.pl?Id=20201031194256>
- Rodrigues, M., & de la Riva, J. (2014). An insight into machine-learning algorithms to model human-caused wildfire occurrence. *Environmental Modelling & Software*, 57, 192–201. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.03.003>

- Sakr, G. E., Elhajj, I. H., & Mitri, G. (2011). Efficient forest fire occurrence prediction for developing countries using two weather parameters. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 24(5), 888-894. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2011.02.017>
- Salazar, D. N., Farfán, M., & Arellano, M. A. (2019). Cartografía de la severidad de los incendios forestales (2017, 2018, 2019) en el estado de Guanajuato empleando imágenes Sentinel-2. *Veranos de la Ciencia*, 5, 1-6. <http://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/3069/pdf>
- Secretaría de Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial (SMAOT, antes Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato) (s.f.). [mapas]. Mapas Ecología Guanajuato. <http://mapas.ecologia.guanajuato.gob.mx/geoexplorer/composer/#maps/1>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (2018). *Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable*. México: Semarnat. <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/ley-de-desarrollo-forestal-sustentable>
- Pyne, S. J., Andrews, P. L., & Laven, R. D. (1996). *Introduction to wildland fire* (2a ed.). New York: John Wiley.
- Sistema Nacional de Información y Gestión Forestal (SNIGF). (s.f.). [En este sistema, se registra, integra, organiza, actualiza y difunde la información en materia forestal, la cual estará disponible al público para su consulta]. SNIGF. <https://snigf.cnf.gob.mx/>
- U. S. Geological Survey (USGS). (2009). *Shuttle Radar Topography Mission (STRM)*. <https://pubs.usgs.gov/fs/2009/3087/>
- Soares-Filho, B., Alencar, A., Nepstad, D., Cerqueira, G., Vera, M. C., Rivero, S., Solórzano, L., & Voll, E. (2004). Simulating the response of land-cover changes to road paving and governance along a major Amazon highway: The Santarem-Cuiabá Corridor. *Global Change Biology*, 10(5), 745-764. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2003.00769.x>
- Soares-Filho, B. S., Nepstad, D., Curran, L. M., Coutinho, G., Garcia, R., Azebedo, C., Voll, E., McDonald, A., Lefebvre, P., & Schlesinger, P. (2006). Modelling conservation in the Amazon basin. *Nature*, 440, 520-523. doi: <https://doi.org/10.1038/nature04389>
- Vilar, L., Camia, A., San-Miguel-Ayanz, J., & Martín, M. P. (2016). Modeling temporal changes in human-caused wildfires in Mediterranean Europe based on land use–land cover interfaces. *Forest Ecology and Management*, 378, 68–78. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.07.020>
- Vilchis-Francés, A. Y., Díaz-Delgado, C., Magaña-Lona, D., Bâ, K. M., & Gómez-Albores, M. Á. (2015). Modelado espacial para peligro de incendios forestales con predicción diaria en la cuenca del río Balsas. *Agrociencia*, 49(7), 803-820. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952015000700008
- Valle, A. R. D. (2017). *Curvas ROC (Receiver-Operating-Characteristic) y sus aplicaciones* (Tesis de Licenciatura). Universidad de Sevilla, España. <https://idus.us.es/handle/11441/63201>
- Villers-Ruiz, L., & López, 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 L. Villers-Ruiz & J. López Blanco (Eds.), *Incendios forestales en México Métodos de evaluación* (1^a ed) (pp. 61-78). México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Zamudio, S. (2012). Diversidad de ecosistemas del Estado de Guanajuato. En *La Biodiversidad en Guanajuato: Estudio de Estado vol. II* (pp. 21-55). México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio)/Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato (IEE). https://www.researchgate.net/publication/259800886_Diversidad_de_ecosistemas_del_estado_de_Guanajuato