

MODELADO ESPACIAL PARA PELIGRO DE INCENDIOS FORESTALES CON PREDICCIÓN DIARIA EN LA CUENCA DEL RÍO BALSAS

TERRITORIAL MODELING FOR DANGER OF WILDFIRES WITH DAILY PREDICTION IN THE BALSAS RIVER BASIN

Aleida Y. Vilchis-Francés^{1*}, Carlos Díaz-Delgado¹, Dolores Magaña-Lona²,
Khalidou M. Bâ¹, Miguel Á. Gómez-Albores¹

¹Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA), Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM). Carretera Toluca-Atlaquemulco km. 14.5, Unidad San Cayetano. 50200. Toluca, Estado de México, México. ²Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM). Cerro de Coatepec, Ciudad Universitaria s/n, 50130. Toluca, Estado de México. (ayvilchisf@uaemex.mx).

RESUMEN

La cuenca del río Balsas es una zona con disponibilidad hídrica limitada, sin embargo exporta anualmente 490 hm³ de agua a la cuenca del Valle de México por medio del sistema Cutzamala. Si los bosques de esta cuenca se deterioran, los recursos hídricos disminuirán y en consecuencia su volumen exportado también, por lo cual se debe identificar factores que favorecen la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales en la cuenca. Así, podrá intervenir de manera preventiva en el manejo de estos fenómenos para aminorar la vulnerabilidad y deterioro de los recursos en la región. De manera equilibrada, los incendios forestales son necesarios para el restablecimiento natural de los ecosistemas, pero su frecuencia ha aumentado por causas antropógenas y la dinámica climática. El objetivo de este estudio fue construir un modelo de regresión logística para la detección diaria de zonas con peligro de incendios forestales. Esta propuesta consideró variables topográficas, meteorológicas y antropógenas para el periodo de 2006 a 2009. Los resultados proporcionaron una efectividad espacial y temporal mayor a 86 %. Una escala de peligro (bajo, moderado, alto y muy alto) fue propuesta de acuerdo con su probabilidad de ocurrencia. En el análisis, más de 85 % de los incendios ocurridos diariamente tuvieron categoría de alto y muy alto peligro de ignición. El mayor peligro se encontró en las cuencas de captación de las presas Valle de Bravo, Colorines-Chilesdo e Ixtapan del Oro, del sistema Cutzamala. Los resultados de este estudio sugieren que la metodología puede usarse para mejorar sistemas de alerta contra incendios y complementar el diseño

ABSTRACT

The Balsas River basin is an area with limited water availability; however, it annually exports 490 hm³ of water to the Valley of Mexico basin through the Cutzamala system. If the forests of this basin deteriorates, the water resources will also diminish and consequently its exported volume will be at risk. For these reasons it is necessary to identify factors that favor the likelihood of fire occurrence in the forest of this basin. In this way, actions can be taken in a preventive manner to manage these phenomena in order to minimize the vulnerability and deterioration of the resources in the region. In a balanced manner, forest fires are necessary for the natural restoration of the ecosystems, nevertheless their frequency has increased by anthropogenic causes and climate dynamics. The objective of this study was to build a logistic regression model for the daily detection of areas with forest fire hazard. This proposal took into account topographic, meteorological and anthropogenic variables for the period from 2006 to 2009. The results provided a spatial and temporal effectiveness larger than 86 %. A risk scale (low, moderate, high and very high) was proposed in accordance with its probability of occurrence. In the analysis, more than 85 % of the fires had a daily category of high or very high risk of ignition. The greatest danger was found in the dams catchment areas of the Valle de Bravo, Colorines-Chilesdo and Ixtapan del Oro, of the Cutzamala system. The results of this study suggests that the methodology can be used to improve early warning systems against fires and complement the design of the strategic location of command centers, camps, watchtowers, as well as priorities for equipment.

*Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: enero, 2014. Aprobado: abril, 2015.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 49: 803-820. 2015.

Key words: Fire management, probability of fire occurrence, logistic regression, Cutzamala system.

de ubicación estratégica de centros de mando, campamentos, torres-observatorio, y prioridades para equipamiento.

Palabras clave: Manejo del fuego, probabilidad de ocurrencia de incendios, regresión logística, sistema Cutzamala.

INTRODUCCIÓN

La región hidrológica del río Balsas tiene una extensión equivalente a 6 % del total nacional, tiene una disponibilidad natural de agua de 2 092 m³ por habitante al año, por lo cual se considera una región con disponibilidad baja y reserva escasa; sin embargo, anualmente se exporta alrededor de 490 hm³ de agua hacia la cuenca del Valle de México (CONAGUA, 2010). Este caudal es cerca de 1100 m y se conduce por una red de acueductos de 127 km, a través del conjunto de obras hidráulicas sistema Cutzamala (CONAGUA, 2005). Este sistema pertenece al área de Ordenamiento Ecológico Región Mariposa Monarca y tiene siete presas: Tuxpan y el Bosque, ubicadas en el estado de Michoacán, y Chilesdo, Colorines, Ixtapan del Oro, Valle de Bravo y Villa Victoria, en el Estado de México (INE, 2009). Durante el periodo de 1999 a 2009, el agua suministrada por el sistema Cutzamala fue mayor a 15 m³ s⁻¹, pero de 2006 a 2009 este caudal disminuyó (CONAGUA, 2009). Por lo tanto, si esta cuenca se deteriora en cualquier forma y en particular en su cobertura forestal, se espera que los recursos naturales disminuyan y, por consecuencia, se reduzca la capacidad proveedora de agua para la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Lo anterior implicaría que en el corto y mediano plazo se generen problemas ecológicos, sociales, económicos y de salud en la ciudad más poblada del país y regiones aledañas.

Por lo anterior, este estudio se orientó hacia la identificación de posibles agentes que favorecen la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales en la región de análisis. Con ello, podrá intervenir de manera preventiva en el manejo de estos fenómenos para aminorar el deterioro de los recursos naturales en la cuenca. Además, según la CONAFOR (2014), el Estado de México es una de las regiones con más incendios cada año (de 1995 a 2013), pero el área afectada en promedio no supera las 4 ha por evento. Esto refuerza la necesidad de identificar con anticipación la probabilidad de ocurrencia de estos

INTRODUCTION

The hydrologic region of the Balsas River has an extension equivalent to 6 % of the Mexican territory, it has a natural water availability of 2 092 m³ *per capita* per year, which is considered to be a low availability and a low reserves region; however, it annually exports around 490 hm³ of water in to the Valley of Mexico basin (CONAGUA, 2010). This water flow is pumped close to 1100 m high and it is driven by a network of aqueducts of 127 km, through a set of hydraulic works of the Cutzamala system (CONAGUA, 2005). This system belongs to the Ecological Region of the Monarch Butterfly and it consists of seven dams: Tuxpan and el Bosque, located in the state of Michoacán, and Chilesdo, Colorines, Ixtapan del Oro, Valle de Bravo y Villa Victoria, in the Estado de Mexico (INE, 2009). During the period between 1999 and 2009, the water supplied by the Cutzamala system was greater than 15 m³ s⁻¹; however, from 2006 to 2009 this trend declined (CONAGUA, 2009). Therefore, if this basin is degraded in any way, in particular in its forest cover, it is to be expected for these natural resources to decrease and, consequently, reduce the capacity of supplying water to the Metropolitan Area of Mexico city. The above implies that in the short and medium-term environmental, social, economic and health problems can arise in the most populous city of Mexico, and neighboring areas.

Therefore, this study aimed toward the identification of potential factors that favor the likelihood of occurrence of forest fires in the region of analysis. With this, preventive actions can be taken to manage these phenomena in order to minimize the degradation of the natural resources in the basin. In addition, according to the CONAFOR (2014), the Estado de Mexico is one of the regions with most forest fires each year (between 1995 and 2013), but the affected area does not exceed 4 ha per event on average. This reinforces the necessity to identify in advance the likelihood of occurrence of these fires in order to protect the forest resources, and therefore, the quantity and quality of the water resources of the region.

Forest fires are due to natural factors, such as lightning, volcanoes, tornadoes, cyclones (Arnaldos *et al.*, 2004), but primarily by anthropogenic factors such as changes in land use, agricultural or tourism

incendios para proteger los recursos forestales y, por tanto, la cantidad y calidad de los recursos hídricos de la región.

Los incendios forestales se deben a factores naturales, como rayos, volcanes, tornados, ciclones (Arnaldos *et al.*, 2004), pero primordialmente por factores antropógenos como cambio de uso del suelo, prácticas agrícolas o de turismo (Carrillo *et al.*, 2012). Cada uno de estos factores, o su combinación, tiene gran influencia en el riesgo de incendios (Bonazountas *et al.*, 2007). Además, características ambientales y topográficas como la temperatura, viento, radiación solar, precipitación, pendiente y orientación de laderas, determinan el comportamiento, la probabilidad de ocurrencia y la superficie afectada por los incendios forestales (Pyne *et al.*, 1996). Por ejemplo, a mayor temperatura los combustibles como los pastos y matorrales pierden humedad (Ruiz y Reyes, 2005), la velocidad y dirección del viento favorece la deshidratación de combustibles e incide en el comportamiento del fuego (Ayala y Olcina, 2002), y una pendiente abrupta facilita el aumento de la velocidad del viento y la formación de corrientes de convección. La orientación de una ladera está relacionada con la cantidad de insolación que reciben los combustibles, lo cual se manifiesta en la humedad del ambiente y en el contenido de humedad de estos materiales (Villers, 2006).

La precipitación en las zonas boscosas es la fuente principal de la humedad contenida en el suelo, aire y en los combustibles, por lo cual la temporada de incendios forestales está vinculada de manera fuerte con la temporada de estiaje. De acuerdo con Bonazountas *et al.* (2007), la tasa de pérdida de humedad también está determinada por la radiación solar, temperatura, pendiente y orientación de laderas. Con base en el régimen de lluvia mensual en México, el periodo de febrero a abril es el más seco del año (CONAGUA, 2010), por lo cual durante esos meses los periodos de déficit de humedad son más largos que en cualquier otra época del año y los combustibles propician el inicio y desarrollo de incendios de alta severidad (CONAFOR, 2012).

Los incendios forestales son parte del proceso natural de regeneración y limpieza del ambiente, pero la intervención de los humanos desequilibra este proceso y pone en riesgo los recursos naturales de su entorno (Martín *et al.*, 1998). Respecto a las causas

practices (Carrillo *et al.*, 2012). Each one of these factors, or their combination, have a great influence on the fire hazard (Bonazountas *et al.*, 2007). In the same way, environmental and topographic features such as temperature, wind, solar radiation, precipitation, slope and slope orientation, determine the behavior, the probability of occurrence and the affected area by forest fires (Pyne *et al.*, 1996). For example, at high temperatures potential fuels such as grasses and shrubs lose more moisture (Ruiz and Reyes, 2005), wind speed and direction favor dehydration of fuels and affect fire behavior (Ayala and Olcina, 2002), and steep slopes facilitates the increase of wind speed and the formation of convection currents. The orientation of a hillside is related to the amount of insolation fuels receive, which is manifested in the atmospheric humidity and the moisture content of these materials (Villers, 2006).

Precipitation in forested areas is the main source of the moisture contained in their soil, air and fuels, by which the forest fire season is strongly linked with the dry season. According to Bonazountas *et al.* (2007), the moisture loss rate is also determined by the solar radiation, temperature, slope and slope orientation. Based on the monthly rainfall regime in Mexico, the period between February and April of the driest in the year (CONAGUA, 2010), so during these months the moisture deficits periods are longer than in any other time of the year and the fuels favor the initiation and development of high-severity fires (CONAFOR, 2012).

Forest fires are part of the natural regeneration and cleaning up processes of the environment, but human intervention disrupts this process and puts at risk the natural resources of their environment (Martín *et al.*, 1998). Regarding the causes of the forest fires, their link with agricultural activities without control is most clear (Vilar, 2006), such as the slash-and-burn of plots preparing the ground for the next crop season. This practice is common, but often control is lost by the unforeseen change of wind direction (PROBOSQUE, 2010). In addition, according to Carrillo *et al.* (2012), the distance to roadways is a human factor linked to the occurrence and spread of forest fires. Near these communication lines, smokers cast matches or lit cigarettes, lit campfires, might have electric lines which are susceptible to fall or rub against trees, there are vehicular accidents, sparks in

de los incendios destaca la vinculación con las actividades agrícolas sin control (Vilar, 2006), como la quema de parcelas para preparación del terreno de la siguiente siembra. Estas prácticas son habituales y con frecuencia se pierde el control por el cambio imprevisto de dirección del viento (PROBOSQUE, 2010). Además, según Carrillo *et al.* (2012), la distancia a las vialidades es un factor humano vinculado con la ocurrencia y propagación de incendios forestales. Cerca de estas vías de comunicación, los fumadores arrojan fósforos o cigarros encendidos, se hacen fogatas, existen líneas eléctricas susceptibles a caerse o que rozan los árboles, hay accidentes vehiculares, se generan chispas en vehículos o maquinaria, se da mantenimiento a bordes carreteros y quema de basura (MMA, 1997).

El Estado de México tiene el Programa Operativo de Prevención y Combate de Incendios Forestales y el Programa de Desarrollo Forestal Sustentable (de la Secretaría del Medio Ambiente estatal), pero las afectaciones continúan cada año. Además, las presiones económicas y sociales a las cuales está sometido el recurso forestal, colocan a las acciones de manejo y conservación en desventaja ante su continuo aprovechamiento y sobreexplotación (PROBOSQUE, 2010). Por lo anterior, se requiere diseñar metodologías que permitan alertar, mitigar, controlar o detener la pérdida de recursos forestales, lo cual se puede obtener mediante el diseño de herramientas de apoyo en la toma de decisiones para la alerta y prevención de incendios no deseados. La hipótesis para este estudio fue que las variables meteorológicas, topográficas y antropógenas determinan el peligro de incendio y es posible construir un modelo probabilístico a partir de tales variables explicativas. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue construir un modelo dinámico de regresión logística a escala diaria para detección de zonas de peligro de incendios en la cuenca del río Balsas, Estado de México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La zona de análisis para aplicación del método propuesto es la cuenca del río Balsas, Estado de México, con énfasis en la región del sistema Cutzamala. La región de la cuenca Balsas está entre 19° 39' 04" y 18° 22' 24" N y 100° 35' 07"

vehicles or machinery are generated, maintenance given to road edges and burning trash (MMA, 1997).

The Estado de Mexico has the Operational Program for the Prevention and Combat of Forest Fires and the Program for Sustainable Forest Development (from the State Ministry of the Environment); however still the negative effects continue each year. In addition, the economic and social pressures to which the forest resources are subjected, place the management and conservation actions at a disadvantage to the continuous development and exploitation (PROBOSQUE, 2010). Therefore, it is necessary to design methodologies that allow to alert, prevent, mitigate, control or stop the loss of forest resources. They can be obtained by designing tools to support decision-making for warning and preventing unwanted fires. The hypothesis for this study was that the environmental, topographic and anthropogenic variables determine the fire hazard and it is possible to build a probabilistic model from such explanatory variables. Therefore, the goal of this research is to build a dynamic model of logistic regression on a daily scale for the detection of areas of fire hazard in the basin of the Balsas River, within the Estado de Mexico.

MATERIALS AND METHODS

Study area

The area of analysis to implement the proposed method is the Balsas River basin, Estado de Mexico, with an emphasis on the region of the Cutzamala system. The region of the Balsas River basin is located between 19° 39' 04" and 18° 22' 24" N and 100° 35' 07" and 98° 36' 25" W. The area is 8740 km² distributed in 33 municipalities with a population of 900 000 inhabitants (INEGI, 2012). The mean annual precipitation is greater than 1000 mm (CONAGUA, 2010). According to the land use of the Cutzamala watershed system, just over 50 % of their catchment areas have natural vegetation cover (Table 1), this emphasizes the importance of the forest conservation in this area.

Databases and available information

In this study, 2821 cells with size 1.8×1.8 km side were used to cover the Balsas basin area within the state. According to the daily forest fire information, the analysis covered the period between January and June, from 2006 to 2009; the last year was only used to validate the method. In order to create the database

y 98° 36' 25" O. Su superficie es 8740 km², hay 33 municipios y una población cercana a 900 000 habitantes (INEGI, 2012). La precipitación media es mayor a 1000 mm anuales (CONAGUA, 2010). De acuerdo con el uso de suelo en las cuencas del sistema Cutzamala, poco más del 50 % de sus áreas de captación tienen cobertura vegetal natural (Cuadro 1), por lo cual se enfatiza la importancia del cuidado forestal de la zona.

Información y bases de datos disponibles

En este estudio se usaron 2821 celdas con tamaño 1.8×1.8 km de lado para cubrir la superficie estatal de la cuenca Balsas. De acuerdo con la información diaria de incendios, el periodo de análisis abarcó de enero a junio del 2006 al 2009; el último año fue solo para validar el método. Con el propósito de formar la base de datos de precipitación diaria que usa el método de cálculo para déficit de humedad, se ocuparon datos de 117 estaciones pluviométricas desde 1962 a 2009 (CONAGUA, 2012a).

Las estadísticas de los incendios forestales en la región fueron obtenidas de PROBOSQUE (2010). Su temporada es de enero a junio, con énfasis en marzo y abril; de manera predominante los incendios se inician entre las 12:00 y 15:00 h, en las horas de mayor insolación, y el 83 % duran menos de 5 h. El área afectada de los 1150 incendios registrados en el periodo de análisis fue 4004 ha, de los cuales 87 % fueron iguales o menores a 4 ha. En la región, el bosque de pino (*Pinus douglasiana* Martínez, *P. devoniana* Lindl., *P. montezumae* Lamb., *P. pseudostrobus* Lindl. y *P. teocote* Schiede ex. Schltdl. & Cham.) es el más afectado por los incendios (50 %), seguido por los bosques de encino (*Quercus rugosa* Née, *Q. macrophylla* Née, *Q. crassipes* Humb. & Bonpl., *Q. elliptica* Née, *Q. acutifolia* Née y *Q. castanea* Née) con 28 %, y oyamel (*Abies religiosa* Kunth Schltdl. & Cham.) con 13 %. El combustible en la cuenca fue

of daily precipitation that uses the moisture deficit method, we utilized data from 117 rainfall stations from 1962 to 2009 (CONAGUA, 2012a).

The forest fires statistics from the region were obtained from PROBOSQUE (2010). Fire season in this area is from January to June, with its high in March and April; fires start predominantly between 12:00 and 15:00 h, during the hours of greatest heat stroke, and 83 % last less than 5 h. The area affected by the 1150 fires during the analysis period was of 4004 ha, of which 87 % were equal to or less than 4 ha. In the region, the pine woods (*Pinus douglasiana* Martínez, *P. devoniana* Lindl., *P. montezumae* Lamb., *P. pseudostrobus* Lindl. and *P. teocote* Schiede ex. Schltdl. & Cham.) were the most affected by fires (50 %), followed by oak forests (*Quercus rugosa* Née, *Q. macrophylla* Née, *Q. crassipes* Humb. & Bonpl., *Q. elliptica* Née, *Q. acutifolia* Née and *Q. castanea* Née) with 28 %, and oyamel (*Abies religiosa* Kunth Schltdl. & Cham.) with 13 %. The fuel in the basin was estimated by Magaña (2012)^[3], according to the United States National Fire Danger Rating System model (NFDRS) and according to the Estado de Mexico forests characteristics set by Nava *et al.* (2010). The surface fuels load in the pine forest is of 29.7 t ha⁻¹, for the cloud forest (*Cornus disciflora* Sessé & Moc., *Garrya laurifolia* Benth., *Meliosma dentata* (Liebm.) Urban, *Oreopanax xalapensis* (Kunth) Decne. & Planch. and *Q. laurina* Bonpl.) is 12.3 t ha⁻¹, and for oak and oyamel forests is 8.6 t ha⁻¹.

Homogeneous regions identification

This study proposes to carry out the analysis of occurrence probability of forest fires taking into account the area affected, by means of a field classification regarding to the coincidence of several features. This classification of spatial coincidences was called homogenous regions. The most important variables which facilitated the identification of the homogenous regions were obtained by using the principal components analysis

Cuadro 1. Uso de suelo en la región del sistema Cutzamala (Fuente: INE, 2009).
Table 1. Land use at the Cutzamala system region (Source: INE, 2009).

Subcuenca	Área (km ²)	Uso agrícola (% del área)	Cobertura vegetal natural (% del área)
Presa Villa Victoria	602	65	28
Presa Chilesdo-Colorines	474	55, parte alta 66, parte media	44, parte alta 30, parte media
Presa Valle de Bravo	535		60, parte alta
Presa Ixtapan del Oro	174	9, parte alta	90, parte alta 54, parte media
Promedio		48	51

estimado por Magaña (2012)^[3] de acuerdo con el modelo National Fire Danger Rating System (NFDRS) de EE.UU. y en concordancia con las características de los bosques mexiquenses según Nava *et al.* (2010). Entonces, la carga de combustibles superficiales para el bosque de pino es 29.7 t ha^{-1} , para el bosque mesófilo de montaña (*Cornus disciflora* Sessé & Moc., *Garrya laurifolia* Benth., *Meliosma dentata* (Liebm.) Urban, *Oreopanax xalapensis* (Kunth) Decne. & Planch. y *Q. laurina* Bonpl.) es 12.3 t ha^{-1} , y para los bosques de encino y oyamel es 8.6 t ha^{-1} .

Identificación de regiones homogéneas

Este estudio propone realizar el análisis de probabilidad de ocurrencia de incendios tomando en cuenta la superficie afectada, por medio de una clasificación del terreno con respecto a la coincidencia de varias características. Esta clasificación de coincidencias espaciales se denominó regiones homogéneas. Las variables más importantes que facilitaron la identificación de las regiones homogéneas se obtuvieron mediante la técnica de análisis de componentes principales (ACP), el cual es un módulo integrado en el programa Idrisi (Eastman, 2012). Las variables para identificación de regiones homogéneas fueron: topográficas, geográficas, cobertura vegetal, climatológicas y características propias de incendios (Cuadro 2).

El proceso de análisis para su identificación inició con todas las variables independientes, se obtuvo el nivel de significancia del grupo por ACP, se eliminó la variable que presentó mayor correlación con alguna otra de las variables consideradas y se realizó el ACP para obtener el nivel de significancia del nuevo grupo de variables independientes. El proceso continuó hasta agotar las combinaciones de variables, y fue seleccionada la mejor significancia y el menor número de las mismas (Vilchis *et al.*, 2012).

Construcción del modelo a nivel diario

Un modelo de regresión logística fue construido y con él se predijo diariamente la probabilidad de ocurrencia espacial y la superficie afectada de los incendios en la zona de estudio. Este tipo de modelos contiene una variable dependiente explicada a través de variables independientes; la variable dependiente se define como la respuesta observada por la influencia de otras variables (Hosmer y Lemeshow, 2000). Este tipo de modelo (1) se usa

technique (PCA), integrated in a module of the Idrisi software (Eastman, 2012). The variables used to identify the homogenous regions were: topographical, geographical, vegetation cover, climatological and fire characteristics (Table 2).

The analysis process for its identification began with all the independent variables, the level of significance of the group was obtained by PCA, the variable that showed the highest correlation with another was discarded and the PCA was carried out to obtain the significance level of the new group of independent variables. This process continued until the combinations of variables were exhausted, and the best significance and the lowest number of variables were selected (Vilchis *et al.*, 2012).

Model building on a daily basis

A logistic regression model was built and with it the daily probability of spatial occurrence and the affected area by the fires in the study area was predicted. This type of model contains a dependent variable explained by independent variables; the dependent variable is defined as the response observed by the influence of other variables (Hosmer and Lemeshow, 2000). This type of model (1) is successfully used in fire hazard analysis

Cuadro 2. Variables para la creación de regiones homogéneas.
Table 2. Variables for the creation of homogenous regions.

Tipo de variable	Característica de la variable
Incendios	1. Superficie afectada (ha) 2. Duración (h) 3. Hora de inicio (h) 4. Carga de combustible (t ha^{-1}) [†]
Geográficas	1. Latitud (°) [†] 2. Longitud (°)
Meteorológicas	1. Días con déficit de humedad, CNS (d) [†] 2. Déficit de humedad (mm)
Suelos	1. Cobertura y tipo de suelo [†]

[†]Variables que explicaron en conjunto más del 99 % de la varianza en el ACP. Por lo tanto fueron consideradas para la agrupación de píxeles en zonas homogéneas. ♦ [†]Variables which, together, explain more than 99 % of PCA variance. Therefore, they were taken into account for grouping pixels into homogenous zones.

³Magaña L., D. 2012. Modelo de peligro de incendio forestal para el Estado de México mediante análisis espacio-temporal del índice de precipitación efectiva. Tesis de Maestría en Ciencias del Agua. Facultad de Ingeniería, Centro Interamericano de Recursos del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, Estado de México. 118 p. ♦ ³Magaña L., D. 2012. Model of forest fire danger for the Estado de Mexico through spatiotemporal analysis of the effective precipitation index. Master's Thesis in Water Science. Faculty of Engineering, Interamerican Water Resources Center, Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, Estado de Mexico. 118 p.

con éxito en investigaciones para análisis del peligro de incendios (Martínez *et al.*, 2004; Vilar, 2006; Madrigal *et al.*, 2007; Pacheco *et al.*, 2009).

$$P = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k)}} \quad (1)$$

donde P es la probabilidad de ocurrencia de la variable dependiente, β_0 es la constante de la regresión, y β_k son factores de ponderación de las variables independientes x_k (de $k=1$ hasta el número total de variables independientes k por ingresar al modelo). Para evaluar la validez espacial entre imágenes de un modelo de regresión logística, el programa Idrisi proporciona un coeficiente de ajuste llamado ROC (*Relative Operating Characteristic*). Si $ROC=1$, muestra una asociación perfecta entre las variables analizadas y si $ROC<0.5$, muestra un ajuste aleatorio entre las variables (Pontius, 2000). Para comprobar la efectividad del método se verificó que como mínimo 80 % de los resultados del modelo coincidieran con los datos reales del año de validación y solo así fue aceptado.

De manera complementaria, para cada variable se realizó el análisis de la razón de momios (OR , *odds ratio*) (2), su probabilidad de ocurrencia y el grado de significancia en la generación de un incendio forestal para la zona de estudio.

$$OR = (a/d)/(b/c) \quad (2)$$

donde a es el número de incendios con la variable presente, b es el total de posibilidades de incendio con la variable presente, c es el número de incendios sin la variable presente, y d es el número de posibilidades de incendio sin la variable presente (Kahn y Sempos, 1989). Si $OR>1$, la variable está asociada con los incendios. Con $OR=1$ los incendios se presentarán con o sin la variable presente. Una $OR<1$ implica que la variable no está asociada con el evento.

La expresión (3) tiene como finalidad identificar la probabilidad de asociación del incendio con el factor de riesgo.

$$P_{OR} = OR/(OR+1) \quad (3)$$

donde P_{OR} es la probabilidad de ocurrencia del momio.

Los intervalos de confianza permiten establecer si una asociación es estadísticamente significativa (Kahn y Sempos, 1989), para lo cual la desviación estándar se expresa con (4):

$$\sigma = (1/a + 1/b + 1/c + 1/d)^{1/2} \quad (4)$$

research (Martínez *et al.*, 2004; Vilar, 2006; Madrigal *et al.*, 2007; Pacheco *et al.*, 2009).

$$P = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k)}} \quad (1)$$

where P is the probability of occurrence of the dependent variable, β_0 is the constant of the regression, and β_k are weighting factors of the independent variables x_k (from $k=1$ up to the total number of independent variables k to enter the model). To assess the spatial validity between images of a logistic regression model, the Idrisi software provides an adjustment coefficient named ROC (*Relative Operating Characteristic*). If $ROC=1$, there is a perfect association between the analyzed variables and if $ROC<0.5$, there is a random adjustment between variables (Pontius, 2000). To check the effectiveness of the method, we tested that at least 80 % of the results of the model would coincide with the actual data of the year of validation and only thus was accepted.

In a complementary manner, for each variable the *odds ratio* (OR) analysis was performed (2), its probability of occurrence and the degree of significance in causing forest fire within the study area.

$$OR = (a/d)/(b/c) \quad (2)$$

where a is the number of fires with the variable present, b is the total possibilities of fire with the variable presence, c is the number of fires without the variable presence, and d is the number of possible fires without the variable (Kahn and Sempos, 1989). If $OR>1$, the variable is associated with the forest fires. With $OR=1$ fires are present with or without this variable. An $OR<1$ value implies that the variable is not associated to the event.

The expression (3) aims to identify the likelihood of association of fire with the risk factor.

$$P_{OR} = OR/(OR+1) \quad (3)$$

where P_{OR} is the probability of occurrence of the odds ratio.

The confidence intervals allow establishing whether an association is statistically significant (Kahn and Sempos, 1989), for which the standard deviation is expressed by (4):

$$\sigma = (1/a + 1/b + 1/c + 1/d)^{1/2} \quad (4)$$

To calculate the confidence intervals of the odds expression (5):

Para calcular los intervalos de confianza de los momios se emplea la expresión (5)

$$IC95\% = OR(e^{\pm(Z^*\sigma)}) \quad (5)$$

donde $IC95\%$ es el intervalo de confianza al 95 %, e representa el número de Euler, con valor de 2.718, $Z=1.96$ es el valor crítico de la distribución normal estandarizada para el intervalo de confianza del 95 %, y σ es la desviación estándar calculada por (4).

Variables explicativas

Para este estudio se consideraron características de incendios y variables de tipo meteorológicas, antropógenas, topográficas y de suelos (déficit de humedad, velocidad de viento, distancia a carreteras, latitud, longitud, pendiente, orientación de ladera, y cobertura de suelo). Las variables elegidas fueron analizadas mediante ACP (similar al usado para creación de zonas homogéneas). Aquellas que agrupadas aportaron mayor significancia como porcentaje de varianza total (89.7 %) se describen a continuación.

Variables meteorológicas

Viento. Chuvieco *et al.* (2010) y Carrillo *et al.* (2012) coinciden en que esta variable es una de las más importantes en la afectación por incendios. Los datos usados corresponden a los de la velocidad máxima mensual registrada en los observatorios sinópticos de: Chapingo, México-D. F., Morelia, Pachuca, Puebla, Querétaro, Tlaxcala, Toluca y Tulancingo (CONAGUA, 2012b). La información anterior fue interpolada para cada mes, se promedió para el periodo de déficit de humedad y se obtuvo la imagen correspondiente con el programa Idrisi.

Déficit de humedad. El periodo de días consecutivos con déficit de humedad fue considerado y éste depende sólo de la precipitación. Esta variable fue estimada por medio del *índice de sequía efectiva* propuesto por Byun y Wilhite (1999). El cálculo comienza por evaluar la reducción diaria de la precipitación (EP_i) en el tiempo (6), con una longitud mínima de registro de 30 años (para este caso el periodo de 1962 a 2009).

$$EP_i = \sum_{n=1}^i \left[\frac{\sum_{m=1}^n P_m}{n} \right] \quad (6)$$

donde EP_i es la precipitación efectiva diaria en milímetros, P_m es la precipitación de los n días anteriores (m va desde 1 hasta n) e, i es el día de análisis (para este estudio se tomó $n=15$; por ejemplo,

$$IC95\% = OR(e^{\pm(Z^*\sigma)}) \quad (5)$$

where $IC95\%$ is the confidence interval at 95 %, e represents Euler number, worth 2.718, $Z=1.96$ is the critical value of the standard normal distribution for the confidence interval at 95 %, and σ is the standard deviation calculated by (4).

Explanatory variables

For this study fire characteristics and weather, anthropogenic, topographic and soil variables (moisture deficit, wind speed, distance to roads, latitude, longitude, slope, slope direction, and land cover) were considered. The chosen variables were analyzed using PCA (similar to the one used to create of homogeneous zones). Those that grouped provided greater significance as a percentage of total variance (89.7 %) are described below.

Weather variables

Wind. Chuvieco *et al.* (2010) and Carrillo *et al.* (2012) agree about this variable being one of the most important for the effect produced by fires. The used data corresponds to monthly maximum speed recorded at the synoptic observatories from: Chapingo, Mexico, D.F., Morelia, Pachuca, Puebla, Queretaro, Tlaxcala, Toluca and Tulancingo (CONAGUA, 2012b). The information above was interpolated for each month, it was averaged for the moisture deficit period and the corresponding image was produced on the Idrisi software.

Moisture deficit. The period of consecutive days with moisture deficit was taken into account, and this depends only in precipitation. This variable was estimated by the *effective drought index* proposed by Byun and Wilhite (1999). The calculation begins by assessing the daily reduction of precipitation (EP_i) through time (6), with a minimum length of 30 years of record (for this case, the period from 1962 to 2009).

$$EP_i = \sum_{n=1}^i \left[\frac{\sum_{m=1}^n P_m}{n} \right] \quad (6)$$

where EP_i is the effective daily precipitation in millimeters, P_m is the precipitation of the n previous days (m ranging from 1 to n) and, i is the day of analysis (for this study was taken $n=15$; for example, to calculate effective precipitation of January 25, EP_{25} , was taken as the precipitation reduction 15 days prior to the date). Then, the deviation of EP_i is obtained respect to its mean (MEP_i) and then EP_i (7 and 8) is standardized.

$$DEP_i = EP_i - MEP_i \quad (7)$$

para calcular la precipitación efectiva del día 25 de enero, EP_{25} , se tomó como la reducción de la precipitación de 15 días anteriores a esa fecha). Después, se obtiene la desviación de EP_i con respecto a su media (MEP_i) y luego se estandariza la EP_i (7 y 8).

$$DEP_i = EP_i - MEP_i \quad (7)$$

donde DEP_i es la desviación de EP_i respecto a MEP_i , SEP_i es la precipitación estandarizada de EP_i , y $Std(EP_i)$ es la desviación estándar de la serie de observaciones para cada día de EP_i . A partir de la SEP_i se obtiene la suma de los días con valores de SEP_i negativos y consecutivos como el periodo con déficit de humedad. Finalmente, de acuerdo con el número de días consecutivos con déficit de EP_i estandarizada para cada periodo, se obtiene la duración de cada periodo con déficit de humedad en la zona de análisis (denominado a partir de esta sección como *CNS*, por sus siglas *Consecutive days of Negative SEP*). Esta variable permite evaluar la disminución de la humedad debida a la falta de precipitación a lo largo del periodo considerado (Vilchis *et al.*, 2012).

Variables antropógenas

Distancia a vialidades. Con esta variable se tomaron en cuenta algunas de las causas humanas que provocan incendios en la cuenca, como la vinculación estrecha con las actividades agrícolas (35 %), actividades turísticas de paseantes (17 %) y actividades forestales (11 %). Estas actividades antropógenas causantes de incendios fueron consideradas en distinta medida con la variable distancia a vialidades. La infraestructura vial del Estado de México incluye 732 km de vías primarias, 5705 km de vías secundarias y 7780 km de caminos rurales (INEGI, 2010). En este estudio se usó una distancia de 500 m a cada lado del eje de las vías carreteras, como potencial influencia significativa para la ignición de incendios. Al respecto, 31 % de los eventos estaban dentro del intervalo de 0 a 500 m en el 2006, 35 % en el 2007, 47 % en el 2008 y 41 % en el 2009. La influencia del hombre en la ocurrencia y propagación de incendios fue analizada y corroborada por Vega *et al.* (1995) y Carrillo *et al.* (2012).

Variables topográficas

Estas variables corresponden a la pendiente y a la orientación de laderas y fueron obtenidas directamente de la imagen digital de elevación de la región por medio del programa Idrisi. Estas variables fueron usadas con éxito como factores facilitadores de la ignición y propagación de incendios por Ruiz y Reyes (2005), Villers (2006) y Bonazountas *et al.* (2007).

Las variables seleccionadas para explicar la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales tienen magnitudes y

where DEP_i is the deviation of EP_i regard MEP_i , SEP_i is the standardized precipitation of EP_i , and $Std(EP_i)$ is the standard deviation of the series of observations for each day of EP_i . From the SEP_i , the sum of the days with negative and consecutive SEP_i value days like the moisture deficit period. Finally, according to the number of consecutive days with standardized EP_i deficit for each period, the duration of each period with moisture deficit is obtained in the test area (referred to from this section on as *CNS* short for *Consecutive days of Negative SEP*). This variable allows assessing the decrease in humidity due to the lack of precipitation during the considered period (Vilchis *et al.*, 2012).

Anthropogenic variables

Distance to roads. With this variable some of human causes that drive fire in the basin were taken into account, like the close linkage with agricultural activities (35 %), tourism activities (17 %) and forest activities (11 %). These anthropogenic activities causing fires were considered in varying degrees regard the distance to roads variable. The road infrastructure in the State of Mexico includes 732 km of primary roads, 5705 km of secondary highways and 7780 km of rural roads (INEGI, 2010). In this study it has been used a 500 m distance to each side of the roads way, as a potential significant influence for fire ignition. In this regard, 31 % of the events were within the 0 to 500 m range in 2006, 35 % in 2007, 47 % in 2008 and 41 % in 2009. The influence of the man in the occurrence and spread of fires was analyzed and corroborated by Vega *et al.* (1995) and Carrillo *et al.* (2012).

Topographic variables

These variables correspond to the slope and slope orientation and were obtained directly from a digital elevation model of the region through the Idrisi software. These variables were successfully used as factors that facilitate the fire ignition and propagation by Ruiz and Reyes (2005), Villers (2006) and Bonazountas *et al.* (2007).

The selected variables to explain the probability of occurrence of forest fires have various magnitudes and units. For the logistic regression model not assign a higher weight to the variables with the greatest magnitude, the scales of each of these variables was homogenized with values from 0 to 1. The value of 1 correspond to the magnitudes of each variable that most affect the probability of fire occurrence at the area of study, as shown in Table 3. The process to standardize the scales of the explanatory variables was proposed in a linear fashion with the use of the integrated module for this purpose in the Idrisi software.

unidades diversas. Para que el modelo de regresión logística no otorgara más peso a las variables con mayor magnitud, se homogeneizaron las escalas de cada una de éstas con valores de 0 a 1. El valor de 1 fue para las magnitudes de cada variable que más afectan la probabilidad de ocurrencia de incendios en la zona de estudio (Cuadro 3). El proceso para homogeneizar las escalas de las variables explicativas se propuso de manera lineal con la utilización del módulo integrado para tal fin en el programa Idrisi.

Variable de respuesta a modelar

La variable dependiente o de respuesta fue identificada como la superficie afectada por incendios forestales en cada una de las celdas de análisis. Esta variable se eligió porque más de 80 % de los eventos en el periodo de estudio tuvieron un área menor a 4 ha. La variable dependiente es considerada de tipo dicotómica (Hosmer y Lemeshow, 2000), en la cual se asigna el valor de 1 para la probabilidad de ocurrencia de incendio con afectación menor a 4 ha y 0 en cualquier otro caso. Todas las investigaciones consultadas tomaron en cuenta solo la probabilidad de ocurrencia o no del incendio. De forma adicional a la presencia de los incendios de hasta 4 ha, en esta propuesta se consideró la superficie afectada por estos fenómenos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la región de estudio, las características con más influencia en la agrupación de regiones homogéneas por medio del ACP fueron cobertura de suelos, tipo de combustible, *CNS* y latitud. La varianza explicada en conjunto por estas variables fue mayor a 99 % de acuerdo con el ACP efectuado, por lo cual se seleccionó este conjunto de variables para la definición de zonas homogéneas. Tres regiones homogéneas fueron identificadas: Zona 1 para bosque de encino (Z1), zona 2 para bosque mesófilo (Z2), y zona 3 para bosque de pino (Z3), correspondientes cada una a las cargas de combustible de 8.6 t ha^{-1} , 12.3 t ha^{-1} y 29.7 t ha^{-1} , respectivamente. Además, como contribución original de esta propuesta metodológica, se presentaron tres ecuaciones para detectar de manera dinámica (diaria) las celdas con peligro de incendios en la cuenca del río Balsas del Estado de México (Cuadro 4).

El estudio, con actualización diaria, detectó las condiciones propicias para la ocurrencia de incendios y la superficie afectada para el periodo de análisis de 2006 a 2008. Los valores del proceso de

Cuadro 3. Pesos de magnitudes de variables para homogeneizar escalas.

Table 3. Magnitudes weights of variables to standardize scales.

Variable	Unidad	Magnitud	Peso
Viento	m s^{-1}	0 a 7.0 mayor a 7.0	0 a 1 1
Déficit de humedad (CNS)	días	0 a 54 mayor a 54	0 a 1 1
Distancia a vialidades	m	0 a 200 mayor a 200	1 a 0 0
Pendiente de ladera	°	0 a 5.4 mayor a 5.4	0 a 1 1
Orientación de la ladera	°	0 a 135 mayor a 135 y hasta 225 mayor a 225 y hasta 360	0 a 1 1 0

Variable response model

The dependent or response variable was identified as the surface affected by fires in each one of the cell of territory under study analysis. This variable was chosen because more than 80 % of the events in the period of analysis had an area of less than 4 ha. The dependent variable is considered to be of dichotomous type (Hosmer and Lemeshow, 2000), in which the value of 1 is assigned to the probability of fire occurrence with less than 4 ha and 0 for any other case. All the consulted research took only into account the probability of fire occurrence. In addition to the fire presence of up to 4 ha, in this proposal the affected surface by these phenomena is considered.

RESULTS AND DISCUSSION

For the study area, the characteristics with the highest influence in the grouping of homogenous regions through the PCA were soil coverage, fuel type, *CNS*, and latitude. The total variance explained by these variables was greater than 99 % according to the PCA, by which this set of variables was selected for the definition of homogeneous areas. Three homogenous regions were identified: Zone 1 for oak forest (Z1), zone 2 for cloud forest (Z2), and zone 3 for pine forest (Z3), each one corresponding to fuel loads of 8.6 t ha^{-1} , 12.3 t ha^{-1} and 29.7 t ha^{-1} each. In addition, as an original contribution of this methodological proposal, three equations were

Cuadro 4. Coeficientes del modelo de regresión logística.
Table 4. Coefficients of the logistic regression model.

Semestre	Zona	Total de incendios	Incendios con extensión < 4 ha	Coeficientes de las variables						
				ROC	B_0	Fija B_1	Diaria B_2	Fija B_3	Mensual B_4	Fija B_5
					Constante	Orientación	CNS	Pendiente	Velocidad viento	Distancia carreteras
En-Jun	Z1	295	246	0.96	-6.11	2.55	-3.78	-3.33	12.72	-1.42
	Z2	77	60	1.00	-17.82	23.97	25.87	0	0	0
	Z3	843	750	0.97	-7.85	-1.51	3.10	0.91	7.47	-0.30

validación para el 2009 se muestran en el Cuadro 5, y se observa que la eficiencia de asertividad global del modelo fue 86.3 %, el cual se obtuvo como la ponderación de las tres zonas de análisis en función del número de incendios ocurridos. Para seleccionar las variables que explicaran la probabilidad de ocurrencia de incendio forestal, se tomó en cuenta el resultado del ACP efectuado. Las variables *CNS*,

presented to dynamically detect (daily) the cells with fire hazard in the basin of the Balsas River at the State of Mexico (Table 4).

The study, which updates daily, found the conditions for fire occurrence and affected area for the period of analysis (2006 to 2008). The values of the validation process for 2009 are shown in Table 5, where the overall efficiency assertiveness

Cuadro 5. Evaluación de la eficiencia del modelo de regresión logística para identificación de sitios con peligro de ocurrencia de incendios forestales de hasta 4 ha (validación con el año 2009).

Table 5. Evaluation of the efficiency of the logistic regression model to identify sites endangered forest fires of up to 4 ha (validation to 2009).

Zona	Número de incendios en el modelo	Categoría de peligro				% eficiencia total [†]
		Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	
Z1	Esperado	56	10	4	1	90
	Ocurrido	52	8	4	0	
	% eficiencia	93	80	100	0	
Z2	Esperado	0	0	0	4	75
	Ocurrido	0	0	0	3	
	% eficiencia	-	-	-	75	
Z3	Esperado	19	0	0	0	74
	Ocurrido	14	0	0	0	
	% eficiencia	74	-	-	-	
% Eficiencia global [‡]						86.3

[†]Porcentaje ponderado de acuerdo con el número de incendios esperados en cada zona. [‡]Porcentaje ponderado de acuerdo con el total de incendios esperados en las tres zonas. [§]Percentage weighted according to the number of fires expected in each area. [¶]Percentage weighted according to the total expected fires in the three areas.

pendiente, orientación de laderas, viento y distancia a las vialidades, fueron suficientes para explicar la superficie afectada del incendio en la región de análisis (se obtuvo la mayor explicación de la varianza por el conjunto de estas variables con el 89.7 % de la varianza total).

Una categoría de peligro de incendios fue establecida de acuerdo con el resultado de su probabilidad de ocurrencia (P) en el periodo de análisis. Los intervalos de estas categorías se definieron en función al porcentaje acumulado de observaciones de los años de estudio. Estos datos se ordenaron de menor a mayor para proponer cuatro intervalos de probabilidad de ocurrencia. La categoría “bajo” fue para 5 % de los datos con $P \leq 0.30$; la categoría de peligro “moderado” para 15 % acumulado de datos con P entre 0.30 a 0.50; las categorías de peligro “alto” y “muy alto” con 30 % y mayor a 50 % de datos acumulados y probabilidades de ocurrencia P de 0.50 a 0.75 y $P \geq 0.75$, respectivamente. De acuerdo con el número de eventos ocurridos de 2006 a 2008, más de 70 % de los incendios tuvieron categoría de peligro alta o muy alta (Cuadro 6), debido a la simultaneidad de los valores de las variables más favorables para la probabilidad de ocurrencia de incendios en los sitios de análisis.

El mayor peligro se encontró en los municipios de Temascaltepec y Coatepec Harinas, así como en las subcuencas del sistema Cutzamala (Figura 1), correspondientes a las presas Valle de Bravo, Colorines-Chilesdo e Ixtapan del Oro (en los municipios de Valle de Bravo, Donato Guerra y Villa de Allende). Las categorías más bajas de peligro de incendios se presentaron en la zona sur, suroeste y este de la región

of the model is of 86.3 %, which was obtained as the weighting of the three areas of analysis in regard to the number of occurred fires. To select the variables that explain the probability of occurrence of forest fires, we took into account the outcome of the performed PCA. The CNS, slope, slope aspect, wind and distance to roads variables were sufficient to explain the forest fire affected area in the region of analysis (the highest variance explanation was obtained by the combination of these variables, which explained 89.7 % of the total variance).

A category of fire hazard was established according with their probability of occurrence (P) in the period of analysis. The intervals of these categories were defined according to the cumulative percentage of observations from the years under study. These data was ordered from lowest to highest in order to propose four intervals of probability of occurrence. The category “low” was for 5 % of the data with $P \leq 0.30$; the “moderate” danger category for 15 % of accumulated data with P between 0.30 and 0.50; the categories of “high” and “very high” danger with 30 % and greater than 50 % of accumulated data and probabilities of occurrence of P 0.50 to 0.75 and $P \geq 0.75$, each. According to the number of events occurring between 2006 and 2008, more than 70 % of the fires were categorized at the high or very high category (Table 6), because of the values of the variables most favorable to the probability of occurrence of fires in the review sites happening simultaneously.

The greatest hazard was found in the municipalities of Temascaltepec and Coatepec Harinas, as well as in the Cutzamala system watersheds (Figure 1),

Cuadro 6. Categoría de peligro y superficie afectada para incendios forestales en la cuenca Balsas, Estado de México.
Table 6. Category danger and surface affected for forest wildfires at the Balsas basin, Estado de México.

Zona	Área afectada (ha) (2006 a 2008)		Número de incendios (2006 a 2008)		Categoría del peligro de ignición de incendios 2006 a 2008 (Número de incendios)			
	Total	%	Total	%	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto
Z1	1163.5	30.8	246	23.3	43	27	60	116
Z2	406	10.7	60	5.7	13	4	11	32
Z3	2209.5	58.5	750	71.0	116	91	155	388
Totales	3779	100	1056	100	172	122	226	536
				Porcentaje	16.2	11.6	21.4	50.8

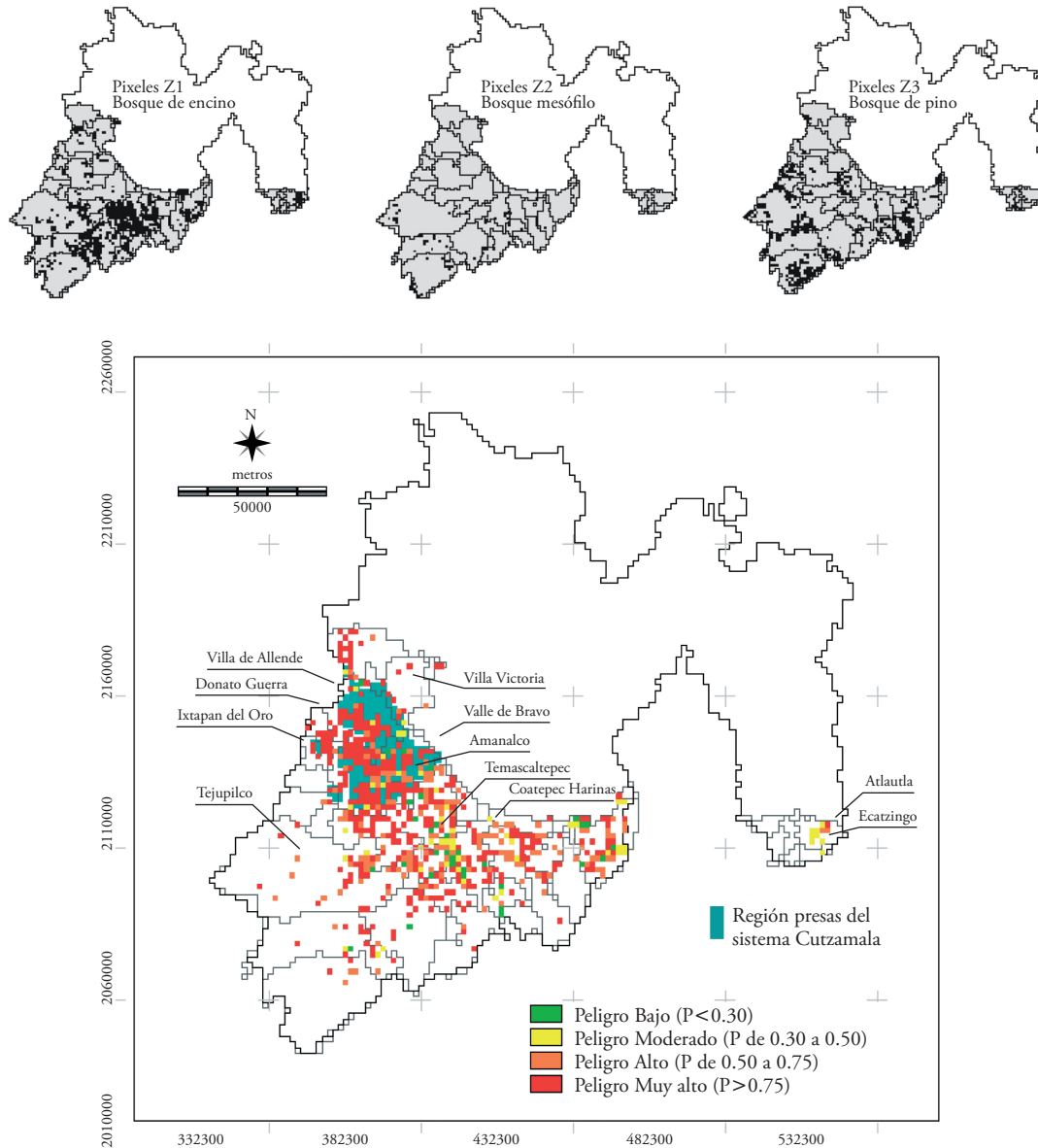


Figura 1. Mapa de peligro de incendios forestales para la cuenca del río Balsas, Estado de México, durante el periodo 2006-2008.

Figure 1. Map of danger of forest fires for the basin of the Balsas River, Estado de México, during the period 2006-2008.

de estudio, correspondiente a los municipios de Tejupilco, Atlautla y Ecatzingo (Figura 1).

El método presentado por Carrillo *et al.* (2012) usando un modelo de regresión logística fue una buena aproximación de la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales para el estado de Puebla, en función de las condiciones meteorológicas, antropógenas y topográficas que favorecen estos fenómenos. Sin embargo, es un modelo estático, a diferencia del modelo presentado en nuestro estudio. La diferencia

correspondiente a los municipios de Valle de Bravo, Colorines-Chilesdo y Ixtapan del Oro (en las municipalidades de Valle de Bravo, Donato Guerra y Villa de Allende). Las categorías más bajas de riesgo de incendio fueron en el sur y el este del área de estudio, correspondiente a las municipalidades de Tejupilco, Atlautla y Ecatzingo (Figura 1).

The method presented by Carrillo *et al.* (2012) using a logistic regression model was a good approximation to the occurrence probability of

primordial es que este modelo facilita la integración del déficit de humedad de manera diaria, por lo cual es un modelo dinámico de predicción que puede identificar los sitios con alta probabilidad de ocurrencia de incendios forestales ($P > 0.75$).

Como prueba de la hipótesis planteada, este estudio tomó en cuenta el análisis de razón de momios y sus intervalos de confianza para determinar la significancia de las variables explicativas del modelo. Esta significancia se presenta si OR y sus dos límites de confianza son mayores de 1 (Kahn y Sempas, 1989). Como se muestra en la Figura 2, las variables con mayor significancia individual fueron CNS y distancia a vías de comunicación. Sin embargo, la combinación de las cinco variables explicó más del 89.7 % de la varianza del fenómeno y las características funcionales para la probabilidad de ocurrencia de incendio (de acuerdo con el análisis de ACP efectuado).

De manera particular, para Z1 que representó bosques de encino y oyamel, las variables que más significancia individual aportaron para la presencia de incendios forestales de hasta 4 ha fueron: CNS , orientación de ladera y distancia a vialidades

forest fires for the state of Puebla, Mexico, regard the weather, anthropogenic and topographic conditions that favor those phenomena. However, this is a static model, unlike the model presented in our study. The key difference is that this model facilitates the integration of the moisture deficit on a daily basis, what makes it a dynamic model of prediction that can identify sites with high probability of the occurrence of forest fires ($P > 0.75$).

As a test of the hypothesis, this study took into account the analysis of odds ratios and their confidence intervals to determine the significance of the explanatory variables of the model. This significance is presented if OR and its two confidence limits are greater than 1 (Kahn and Sempas, 1989). As shown in Figure 2, the variables with the greatest individual significance were CNS and distance to roads. However, the combination of the five variables explained more than 89.7 % of the variance of the phenomenon and the functional characteristics for the occurrence probability of fire (according with the PCA analysis).

In particular, for Z1 which represented oak and oyamel fir forests, the variables that most individual

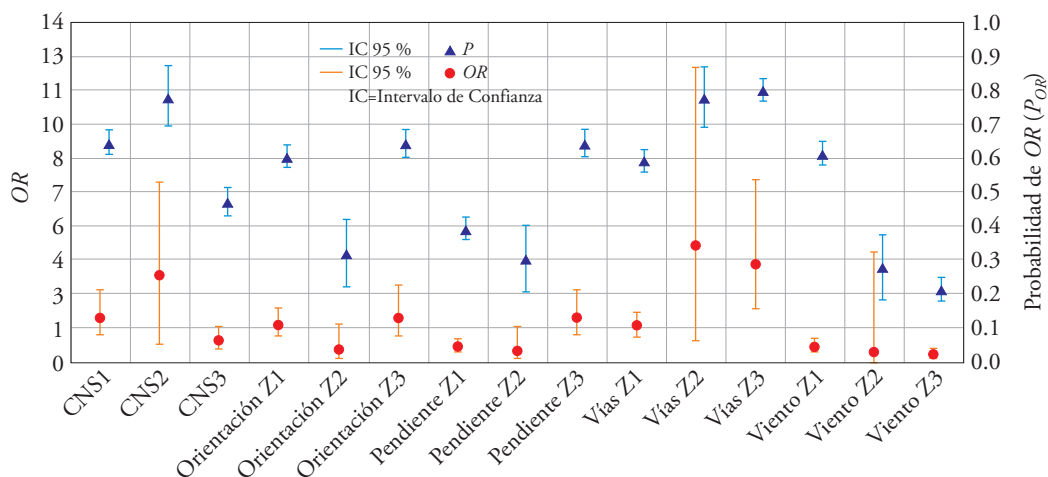


Figura 2. Probabilidad y razón de momios, con sus intervalos de confianza, para cada una de las variables del modelo de regresión logística. IC es el intervalo de confianza, P_{OR} es la probabilidad de ocurrencia de la variable, OR es la razón de momios de la variable, CNS representa los días con déficit de humedad, Orientación representa la orientación de ladera ($^{\circ}$), Pendiente representa la pendiente de la ladera ($^{\circ}$), Vías representa la distancia a las vialidades (m), y Viento la velocidad del viento ($m s^{-1}$).

Figure 2. Probability and odds ratio, with their confidence intervals, for each of the variables in the logistic regression model. IC is the confidence interval, P_{OR} is the probability of variable occurrence, OR is the odds of the variable ratio, CNS represents the days with humidity deficit, Orientación represents the orientation of slope ($^{\circ}$), Pendiente represents the slope of the hillside ($^{\circ}$), Vías represents the distance to roads (m), and Viento the wind speed ($m s^{-1}$).

(Figura 2). Esto se explica por la orientación sur de las laderas, con mayor déficit de humedad en el suelo y los combustibles forestales están más secos. Además, en la zona sur del Estado de México hay una mayor densidad de caminos rurales, brechas y carreteras, las cuales pueden aumentar la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales.

Como se observa en el Cuadro 4, el coeficiente *CNS* dentro del modelo logístico para esta zona tuvo influencia negativa; pero Pacheco *et al.* (2009) y Carrillo *et al.* (2012) reportan una influencia positiva de las variables climáticas. Esta última condición sí concuerda con la variable velocidad del viento, que en nuestro modelo presentó el mayor coeficiente con magnitud positiva, con un valor de 12.42 (Cuadro 4). Para la variable pendiente de laderas, este modelo logístico mostró influencia negativa (−3.33; Cuadro 4), aunque según Villers (2006) y Bonazountas *et al.* (2007) esta variable influye positivamente en la probabilidad de ocurrencia de incendios. Una razón para esta discrepancia en la variable pendiente sería que en los píxeles de esta zona no hay pendientes del terreno mayores a 5.4°. Finalmente, el modelo logístico (Cuadro 4) también atribuye una influencia negativa (−1.42) a las características antropógenas relacionadas con incendios (incluidas en este estudio como distancia a vialidades). El valor negativo del coeficiente asociado con esta variable denota una mayor probabilidad de incendios cuando la distancia a vialidades es menor (de manera inversa que las demás variables, con mayor probabilidad cuando los valores son altos). Por lo tanto, estos resultados no concuerdan con los presentados por Chuvieco *et al.* (2010) y Carrillo *et al.* (2012) porque ellos representaron parte de las variables antropógenas como la densidad de caminos y carreteras, y para nuestro estudio se usó la distancia a las vialidades.

Para Z2, el bosque mesófilo, las variables individuales más significativas fueron *CNS* y distancia a vialidades (Figura 2). Pero de acuerdo con los coeficientes del modelo logístico, las variables orientación de laderas y *CNS* fueron las únicas que influyeron de manera combinada para la probabilidad de ocurrencia de incendios (Cuadro 4). Esto no significa, de manera necesaria, que las demás variables carezcan de importancia en esta zona, porque no hay una amplia cobertura de este tipo de vegetación en ella (solo hubo 71 píxeles con este tipo de bosque).

significance contributed to the presence of forest fires of up to 4 ha were: *CNS*, orientation of hillside and distance to roads (Figure 2). This is explained by the south orientation of the slopes, with a greater moisture deficit in the soil and drier forest fuels. In addition, there is a greater density of rural roads in the southern region of the Estado de Mexico, gaps, and roads, which can increase the forest fires probability occurrence.

As shown in Table 4, the *CNS* coefficient within the logistic model for this area had negative influence; however, Pacheco *et al.* (2009) and Carrillo *et al.* (2012) report a positive influence of the climatic variables. This last condition does match the wind speed variable, which in our model had the highest ratio with positive magnitude, with a value of 12.42 (Table 4). For the slope of hillsides variable, this logistic model showed negative influence (−3.33; Table 4), although Villers (2006) and Bonazountas *et al.* (2007) mentioned that this variable has a positive effect on the fire occurrence probability. One reason for this discrepancy in the slope variable would be that in the pixels of this area the ground slope was not greater than 5.4°. Finally, the logistic model (Table 4) also attaches a negative influence (−1.42) to the anthropogenic fire-related features (included in this study as distance to roads). The negative value of the coefficient associated with this variable denotes a greater probability of fires when the distance to roads is less (in the opposite way that the other variables, with higher probability where the values are high). Therefore, these results do not match with those presented by Chuvieco *et al.* (2010) and Carrillo *et al.* (2012) because these authors accounted for part of the anthropogenic variables such as the density of roads and highways, and in our study distance to the roadways was used.

To Z2, the cloud forest, the most significant individual variables were *CNS* and distance roadways (Figure 2). However, according to the coefficients of the logistic model, the slope orientation and *CNS* variables were the only variables in combination to influence the probability of occurrence of fires (Table 4). This does not mean, so necessary, that other variables are unimportant in this area, because there is no a wide coverage of this type of vegetation in it (there were only 71 pixels with this type of forest). Therefore, there were few significant variables in other areas.

Por lo tanto, hubo pocas variables significativas en esta zona.

Para Z3 que representó la cobertura de bosque de pino, las variables con más significancia individual fueron *CNS*, pendiente de laderas, orientación de laderas y distancia a vialidades (Figura 2). De acuerdo con el modelo de regresión logística, hubo una influencia positiva en la probabilidad de ocurrencia de incendios para las variables *CNS*, pendiente de ladera y velocidad del viento (Cuadro 4). Estas condiciones concuerdan con los resultados de Villers (2006), Bonazountas *et al.* (2007) y Pacheco *et al.* (2009). Pero esta zona aportó un coeficiente de influencia negativa (Cuadro 4) para orientación de ladera, lo cual no concuerda con Carrillo *et al.* (2012). De acuerdo con la variable que integra las características antropógenas relacionadas con incendios forestales, este modelo obtuvo una influencia negativa (Cuadro 4) lo que contrasta con los estudios de Vilar (2006), Villers (2006) y Carrillo *et al.* (2012), quienes encontraron influencia positiva de factores antropógenas en la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales. Una razón para esta diferencia sería que en nuestro estudio se otorga más peso si la distancia a las vialidades es menor.

Aunque las razones de momios fueron significativas para algunas de las variables explicativas en la zona de estudio, su combinación en el modelo de regresión logística mostró que puede aumentar la probabilidad de ocurrencia de incendios (Figura 2). Es decir, las variables en conjunto aumentaron la probabilidad para que un incendio se presentara porque: 1) *CNS* estuvo directamente relacionada con un bajo contenido de humedad en los combustibles; 2) las exposiciones que tienden al sur (135° a 225°) reciben más radiación durante el año y la humedad de los combustibles es menor sobre ellas; 3) la pendiente del terreno favoreció la velocidad de propagación de los incendios; 4) la distancia a vialidades estuvo relacionada con riesgo antropógena de incendio; y 5) el viento favorece la propagación de incendios. Por lo tanto, si ocurren las cinco variables simultáneamente, la probabilidad de ocurrencia de incendios es mayor, como mostró el modelo de regresión logística de nuestro estudio para cotejo de la hipótesis. Lo anterior también está en la Figura 2, donde hay una mayor concentración de incendios en los municipios de las subcuencas del sistema Cutzamala (Amanalco, Valle de Bravo, Villa de Allende y Donato Guerra).

For Z3 which represented the coverage of pine forest, the variables with more individual significance were *CNS*, slope of slopes, orientation of slopes and distance to roadways (Figure 2). In accordance with the logistic regression model, there was a positive influence on the probability of occurrence of fire for the variables *CNS*, hillside slope and wind speed (Table 4). These conditions are consistent with the results of Villers (2006), Bonazountas *et al.* (2007) and Pacheco *et al.* (2009). However, this area provided a coefficient of negative influence (Table 4) for facing slope, a situation that does not correspond with Carrillo *et al.* (2012). In accordance with the variable that integrates the anthropogenic features related to forest fires, this model obtained a negative influence (Table 4) which is in contrast with the studies of Vilar (2006), Villers (2006) and Carrillo *et al.* (2012), who found positive influence of anthropogenic factors on the probability of forest fires occurrence. One reason for this difference would be that our study gives more weight if the distance to the roadways is shorter.

Although odds ratios were significant for some of the explanatory variables in the study area, their combination in the logistic regression model showed that can increase the probability of fire occurrence (Figure 2). In other words, together variables increased the likelihood for a fire is present because: 1) *CNS* was directly related to a low moisture content in fuels; 2) exposures that tend to the south (135° to 225°) receive more radiation during the year and the moisture content of their fuels is low; 3) slope terrain favored the propagation speed fires; 4) distance to roads was associated with anthropogenic risk fire; and 5) wind favors the spread of fire. Therefore, if the five variables occur simultaneously, the probability of fire occurrence is greater, as demonstrated by the logistic regression model of our study for comparison of the hypothesis. The foregoing is also in Figure 2, where there is a greater concentration of fire in the municipalities of the Cutzamala watersheds system (Amanalco, Valle de Bravo, Villa de Allende and Donato Guerra). These sites include slopes with southern exposure, slopes greater than 5.4° and in water season were the driest (higher values of *CNS*). These variables adds the closeness roads and significant values of wind speed, which together with the combination of all the variables produced an area with high probability of fire occurrence ($P > 0.75$).

Estos sitios incluyen laderas con exposición sur, pendientes mayores a 5.4° y en época de estiaje fueron las más secas (mayores valores de *CNS*). A estas variables se suma la cercanía de carreteras y valores significativos de velocidad de viento, que junto con la combinación de todas las variables produjeron una zona con alta probabilidad de ocurrencia de incendios ($P > 0.75$).

CONCLUSIONES

La hipótesis de este estudio se cumplió y el modelo mostró que las variables analizadas (meteorológicas, topográficas y antropógenas) fueron significativas y suficientes para predecir diariamente la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales. Esta metodología tuvo una efectividad de 86.3 % en la cuenca del río Balsas, dentro de los límites del Estado de México. Aunque se tomó en cuenta solamente la superficie afectada menor de 4 ha, el modelo propuesto detectó todos los incendios con superficies afectadas mayores a este umbral de superficie ocurridos en 2009. La categoría de peligro detectado para estos eventos fue de alto y muy alto para más de 75 % de los eventos ocurridos en el año de validación.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) el apoyo otorgado bajo la modalidad de beca para estudios de Doctorado en Ciencias del Agua para el primer autor y el proyecto de financiación 248498. A la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM) por el apoyo financiero 38812015M.

LITERATURA CITADA

- Arnaldos V., J., X. Navalón N., E. Pastor F., y E. Planas C. 2004. Manual de Ingeniería Básica para la Prevención y Extinción de Incendios Forestales. Mundi-Prensa. España. 414 p.
- Ayala C., F. J., y J. Olcina C. 2002. Riesgos Naturales. Ariel Ciencia. España. 1512 p.
- Bonazountas, M., D. Kallidromitou, P. Kassomenos, and N. Passas. 2007. A decision support system for managing forest fire casualties. *J. Environ. Manage.* 84: 412-418.
- Byun, H. R., and D. A. Wilhite. 1999. Objective quantification of drought severity and duration. *J. Climate* 12: 2747-2756.
- Carrillo G., R. L., D. A. Rodríguez T., H. Tchikoué, A. I. Monterroso R., y J. Santillán P. 2012. Análisis de peligro espacial de peligro de incendios forestales en Puebla, México. *Interciencia* 37(9): 678-683.

CONCLUSIONS

The hypothesis of this study was fulfilled and the model showed that the variables analyzed (meteorological, topographic and anthropogenic variables) were significant and sufficient to predict at a daily level the probability of forest fires occurrence. This methodology had 86.3 % effectivity in the upper Balsas River basin, within the limits of the Estado de Mexico. Although, it took into account only the affected area less than 4 ha, the proposed model detected all fires with affected areas higher to this threshold that occurred in 2009. The category of danger detected for these events was high and very high for more than 75 % of the events that occurred in the year of validation.

—End of the English version—



- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2012. Temporada de incendios, alerta ante sequía. <http://www.conafor.gob.mx/portal/index.php/component/content/article/6/356>. (Consulta: Agosto 2012).
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2014. Información estadística de cierre de incendios forestales. <http://www.conafor.gob.mx/web/temas-forestales/incendios/> (Consulta: Noviembre 2014).
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2005. Sistema Cutzamala, agua para millones de mexicanos. Gerencia Regional de Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala. CONAGUA. México. 48 p.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2009. Estadísticas del Agua de la Región Hidrológico-Administrativa XIII, Aguas del Valle de México. CONAGUA. México. 162 p.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2010. Estadísticas del agua en la cuenca del río Balsas. CONAGUA. México. 180 p.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2012a. Comisión Nacional del Agua - Servicio Meteorológico Nacional. Información de estaciones climatológicas normales en México. http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=75. (Consulta: Enero 2012).
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2012b. Comisión Nacional del Agua - Servicio Meteorológico Nacional. Información de Observatorios Sinópticos de México. http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=29&Itemid=93. (Consulta: Marzo 2012).
- Chuvieco E., I. Aguado, M. Yebra, H. Nieto, J. Salas, M. P. Martín, L. Vilar, J. Martínez, S. Martín, P. Ibarra, J. de la Riva, J. Baeza, F. Rodríguez, J. R. Molina, M. A. Herrera, and R. Zamora. 2010. Development of a framework for fire risk assessment using remote geographic information system technologies. *Ecol. Model.* 221: 46-58.

- Eastman, J. R. 2012. Idrisi Selva Manual. Clark University. USA. 322 p.
- Hosmer, D. W., and L. Lemeshow. 2000. Applied Logistic Regression. 2nd ed. John Wiley and Sons, Inc. New York. 392 p.
- INE (Instituto Nacional de Ecología). 2009. Priorización y recomendaciones de acciones de conservación en las subcuencas del sistema Cutzamala. Dirección de manejo integral de cuencas. Dirección general de investigación de ordenamiento ecológico y conservación de ecosistemas del Instituto Nacional de Ecología. México. 25 p. http://www.ine.gob.mx/descargas/cuencas/subcuencas_cutzamala.pdf (Consulta: Septiembre 2013).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2010. Anuario Estadístico. Estado de México. INEGI. México. <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/aee11/estatal/mex/default.htm>. (Consulta: Julio 2013).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2012. Información nacional por entidad federativa. <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/> (Consulta: Abril 2012).
- Kahn H. A., and Sempow C. T. 1989. Statistical Methods in Epidemiology. Oxford University Press. New York. pp: 56-63.
- Madrigal O., J., C. Hernando L., M. Guijarro G., y C. Díez G. 2007. El uso de modelos logísticos para la predicción de la regeneración postincendio de *pinus pinaster ait.*: aplicación al incendio de robledillo de Gata (Sierra de Gata, Cáceres). *In: Actas de la II Reunión sobre aspectos prácticos de la Modelización Forestal. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales* 23: 215-220.
- Martín I., M. P. E. Chuvieco S., e I. Aguado. 1998. La incidencia de los incendios forestales en España. *Serie Geográfica (Universidad de Alcalá)* 7: 23-36.
- Martínez J., E. Chuvieco, y P. Martín. 2004. Estimación de factores de riesgo humano de ignición en España mediante regresión logística. *In: Memorias del Segundo Simposio Internacional Sobre Políticas, Planificación y Economía de los Programas de Protección Contra Incendios Forestales: Una Visión Global. Córdoba España. Abril. USDA Forest Service, General Technical Report PSW-GTR-208. Albany, CA. pp: 281-293.*
- MMA (Ministerio del Medio Ambiente). 1997. Taller distrital sobre control y extinción de incendios forestales. Dirección General Forestal y de Vida Silvestre. República de Colombia. Santa Fé Bogotá.
- Nava B., G., A. Endara A., H. H. Regil G., C. Estrada V., C. M. Arriaga J., y S. Franco M. 2010. Los Bosques y Selvas del Estado de México. Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales. Universidad Autónoma del Estado de México. México. 144 p.
- Pacheco C., E., I. Aguado, y H. Nieto. 2009. Análisis de ocurrencia de incendios forestales causados por rayo en la España peninsular. *GeoFocus* 9: 232-249.
- Pontius, R. G. Jr. 2000. Quantification error versus location error in comparison of categorical maps. *Photogrammetric Eng. Remote Sensing* 66(8): 1011-1016.
- Pyne, S. J., Andrews, P. L., Laven, R. D. 1996. Introduction to Wildland Fire. 2nd ed. Wiley. New York. 808 p.
- PROBOSQUE (Protectora de Bosques). 2010. Programa de prevención y combate de incendios. México. <http://www.edomex.gob.mx/portal/page/portal/probosque/proteccion/incendios>. (Consulta: Noviembre 2010).
- Ruiz S., J. D., y F. J. Reyes P. 2005. Geografía Física Aplicada. Serie: Manuales. Universidad de Málaga. España. 505 p.
- Vega G., C., P. M. Woodard, S. J. Titus, W. L. Adamowicz, and B. S. Lee. 1995. A logit model for predicting the daily occurrence of human caused forest fires. *Int. J. Wildland Fire* 5(2): 101-111.
- Vilar del H. L. 2006. Empleo de regresión logística para la obtención de modelos de riesgo humano de incendios forestales. *In: Memorias del XII Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica. Granada España. Septiembre. pp: 531-543.*
- Vilchis F., A. Y., C. Díaz-Delgado, K. M. Bâ, M. A. Gómez A. y D. Magaña L. 2012. La sequía en la modelación de riesgo de incendios forestales en la cuenca Lerma, Estado de México. *In: Resúmenes XXII Congreso Nacional de Hidráulica. Noviembre, 2012. Acapulco, Guerrero, México. pp: 191-192.*
- Villers R., L. 2006. Incendios forestales. *Ciencias* 81: 61-66.